

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Tubos enterrados para aquecimento e arrefecimento
de edifícios: efeito das condições de fronteira e do
caudal variável. Caso de estudo do edifício Solar XXI.

Ana Cláudia Vieira Oliveira

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2013

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Tubos enterrados para aquecimento e arrefecimento de edifícios: efeito das condições de fronteira e do caudal variável. Caso de estudo do edifício Solar XXI.

Ana Cláudia Vieira Oliveira

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Orientadores:

Pierre Hollmuller (Université de Genève)

Marta Panão (FCUL, LNEG)

2013

Abstract

The concern on climate changes has been a motive for research and debate all over the world. The European Commission, as representative of the interests of all countries of the European Union, has developed a series of strategies, included in the plan Europe 2020, which refer to the improvement of the energetic efficiency and the increase in the penetration of renewable energy sources. Representing a great amount of energy consumption, the building sector reveals to be a key element in fighting greenhouse gas emissions, making the research on technology, which is inherent to it, a motive of interest.

In this work, we studied the functioning of air/soil heat exchangers for heating and cooling of buildings. Through the numeric simulation model, *Type460*, we searched about the effect of border conditions, as well as the transient regimes. This study had as one of its objectives the simplification of dimensioning method of this kind of systems, bypassing the need of simulation. For a more practical and realistic vision, we analyzed a system installed in the building Solar XXI, owned Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

With this study, we verified that the obtaining of possible results in simplifying the design method depends greatly on the analysis method used. Being that, for the transient regimes, the method applied lacks deeper research. About the practical case, the comprehension of all phenomena, that are inherent to it, depends both on data acquisition as a more detailed numerical simulation.

Keywords: Air/soil heat exchangers, *Type 460*, border conditions, transient regimes, Solar XXI

Resumo

A preocupação com as alterações climáticas tem sido motivo de investigação e debate em todo o mundo. A Comissão Europeia, como representante dos interesses de todos os países da União Europeia, tem desenvolvido uma série de estratégias, incluídas no plano Europa 2020, que visam a melhoria da eficiência energética e o aumento da penetração de fontes de energias renováveis. Representando uma grande parte do consumo energético, o sector dos edifícios revela-se como o elemento chave no combate à emissão de gases com efeito de estufa, tornando a investigação sobre as tecnologias que lhe são inerentes motivo de interesse.

Neste trabalho estudou-se o funcionamento dos sistemas de tubos enterrados para aquecimento e arrefecimento de edifícios. Através do modelo de simulação numérica, *Type460*, investigou-se acerca da influência das condições de fronteira bem como o efeito do caudal variável. Este estudo teve como um dos objetivos a simplificação do dimensionamento deste tipo de sistemas, contornando a necessidade de simulação. Para uma visão mais prática e realista foi analisado o sistema instalado no edifício Solar XXI, pertencente Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

Com este estudo verificou-se que a obtenção de resultados possíveis de simplificar o método de dimensionamento depende fortemente do método de análise aplicado, sendo que, para regimes de funcionamento a fluxo descontínuo, o método a aplicar carece de investigação mais profunda. Relativamente ao caso prático, a compreensão de todos os fenómenos que lhe são inerentes depende tanto de uma aquisição de dados como de uma simulação numérica mais detalhada.

Palavras-chave: permutadores ar/solo, *Type 460*, condições fronteira, caudal variável, Solar XXI

Agradecimentos

A tese, embora trabalho individual, é fruto da intervenção de um conjunto de pessoas e organizações que merecem um especial agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao professor Pierre Hollmuller pela oportunidade que me deu para crescer, não só a nível profissional, mas também a nível pessoal. Agradeço-lhe pela forma como orientou o meu trabalho, pela dedicação e pelo tempo dispensado. Foi, sem dúvida, a base para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço à Universidade de Genebra por, em conjunto com o professor Pierre Hollmuller, me proporcionar uma nova experiência de vida.

À professora Marta Panão, agradeço a sua colaboração, em conjunto com o LNEG, na disponibilização de dados. Agradeço a sua disponibilidade e interesse demonstrado.

Agradeço a todos os professores, não só ao longo do curso mas também em todo o percurso escolar, que, transmitindo o seu saber, contribuíram para a minha evolução.

Aos colegas de curso que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso académico. Um especial agradecimento à Sara Freitas, por, além da amizade e companheirismo, ter aceite ser minha procuradora durante todo o percurso universitário.

Pelo acolhimento em Lisboa, agradeço à residência RMI por me fazer sentir em casa. Um obrigada às residentes-amigas que atenuaram os momentos de saudade.

Aos meus familiares que me apoiaram, deram força, me reconfortaram e estiveram sempre de braços abertos para me receber. Agradeço especialmente à prima Ângela por estar sempre disposta a acolher-me em Lisboa e por ter colorido os primeiros meses na capital.

Por último, mas em primeiro, um grande obrigada à minha mãe e minha irmã por sempre acreditarem em mim e me apoiarem em todas as decisões mesmo que o mar nos separe.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Consumo para climatização.....	1
1.3.	Tecnologias de aquecimento e arrefecimento	2
1.4.	Objetivos	3
1.5.	Estrutura	4
2.	Permutadores Ar/Solo	5
2.1.	Descrição	5
2.2.	Solo.....	5
2.3.	Distribuição da tubagem.....	5
2.4.	Admissão de ar	6
2.5.	Manutenção	6
3.	Modelos Matemáticos	7
3.1.	Modelos Analíticos.....	7
3.2.	Modelos Numéricos	9
4.	Metodologia.....	10
4.1.	Climas analisados	10
4.2.	Tipos de geometria	11
4.3.	Superfícies	12
4.4.	Fluxos	12
4.5.	Obtenção de resultados.....	12
4.5.1.	Método dos Mínimos Quadrados	13
4.5.2.	Análise de Fourier	16
4.5.3.	Comparação de Métodos	20
4.5.4.	Evolução temporal.....	22
5.	Modelo Analítico e de Simulação	25
6.	Modelo de Simulação	27
6.1.	Condições de fronteira variáveis	27
6.1.1.	Convecção sem absorção de radiação vs Adiabática.....	27
6.1.2.	Variação da temperatura com a profundidade	31
6.1.3.	Efeito da absorção de radiação	32
6.2.	Caudal variável.....	34
6.2.1.	Compact Pipes	34
6.2.2.	Distant Pipes	37
7.	Caso de estudo: Edifício Solar XXI	39
7.1.	Caracterização do sistema	39
7.2.	Metodologia.....	39

7.3. Resultados	40
8. Conclusões	45
9. Bibliografia.....	46
Anexos.....	47
Anexo A - Gráficos de dispersão:T0Med vs T50Med, para o clima de Lisboa.	47
Anexo B - Gráficos de dispersão:T0Med vs T50Med, para o clima de Genebra.....	48
Anexo C - Gráficos de dispersão:T0Med vs T50Med, para o clima de São Paulo.	49
Anexo D - Gráficos de dispersão: vigésimo ano de funcionamento para o clima de Lisboa	50
Anexo E - Gráficos de dispersão: vigésimo ano de funcionamento para o clima de Genebra.....	51
Anexo F - Gráficos de dispersão: vigésimo ano de funcionamento para o clima de São Paulo.....	52
Anexo G – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria <i>Compact Pipes</i> e clima de Lisboa	53
Anexo H – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria <i>Compact Pipes</i> e clima de Genebra.....	54
Anexo I – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria <i>Compact Pipes</i> e clima de São Paulo	55
Anexo J – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria <i>Distant Pipes</i> e clima de Lisboa	56
Anexo K – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria <i>Distant Pipes</i> e clima de Genebra	58
Anexo L – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria <i>Distant Pipes</i> e clima de São Paulo.....	60
Anexo M - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Compact Pipes</i> e clima Virtual	62
Anexo N – Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Compact Pipes</i> e clima de Lisboa	64
Anexo O - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Compact Pipes</i> e clima de Genebra	68
Anexo P - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Compact Pipes</i> e clima de São Paulo	72
Anexo Q - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Distant Pipes</i> e clima Virtual	76
Anexo R - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Distant Pipes</i> e clima de Lisboa	79
Anexo S - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Distant Pipes</i> e clima de Genebra	83
Anexo T - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria <i>Distant Pipes</i> e clima de São Paulo	87

Índice de Figuras

Fig. 1 - Evolução do consumo de eletricidade nos sectores residencial e de serviços. Fonte: Eurostat [6]	2
Fig. 2 – Esquema de transferência de calor para um permutador ar/solo cilíndrico. Fonte: [11].....	7
Fig. 3 – Localização dos climas típicos: São Paulo (A), Lisboa (B), Genebra (C).	10
Fig. 4 – Perfil de temperaturas médias diárias para os climas típicos (Lisboa, Genebra e São Paulo) e para o clima virtual.....	10
Fig. 5 – Esquema representativo das duas geometrias utilizadas: A. geometria <i>Compact Pipes</i> e B. geometria <i>Distant Pipes</i> . Os esquemas não estão à escala.	11
Fig. 6 – A. Extremos diários de temperatura do ar à entrada e saída do tubo B. Temperatura média diária do ar à entrada e saída de um tubo com L=30m.	13
Fig. 7 – Temperatura de saída em função da temperatura de entrada para A. L=30m e B. L=50m.	14
Fig. 8 - Temperatura média diária e temperatura média, durante o período de funcionamento, do ar à entrada e à saída do tubo para regime contínuo.	14
Fig. 9 - Temperatura média diária e temperatura média, durante o período de funcionamento, do ar à entrada e à saída do tubo para regime descontínuo.	15
Fig. 10– Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DTout com base em T50Med, para A. 24h12M B. 24h6M C. 12h12M e D. 12h6M.....	15
Fig. 11 – Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DTout com base em T0Med, para A. 24h12M B. 24h6M C. 12h12M e D. 12h6M.	16
Fig. 12 - Extremos diários de temperatura do ar simulados e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Lisboa.	17
Fig. 13 – Temperatura média diária do ar simulada e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Lisboa.....	17
Fig. 14 - Extremos diários de temperatura do ar simulados e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Genebra.....	18
Fig. 15 - Temperatura média diária do ar simulada e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Genebra.	18
Fig. 16 - Extremos diários de temperatura do ar simulados e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de São Paulo.	18
Fig. 17 - Temperatura média diária do ar simulada e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de São Paulo.	19
Fig. 18 – Fatores de atenuação diários (A. C. e E.) e anuais (B. D. e F.) segundo diferentes métodos, para superfície adiabática.	20
Fig. 19 - Fatores de atenuação diários (A. C. e E.) e anuais (B. D. e F.) segundo diferentes métodos, para superfície com convecção sem absorção solar.	21
Fig. 20 – Gráficos de dispersão referentes ao clima virtual, no vigésimo ano de funcionamento, para A. 24h12M B. 24h6M C. 12h12M e D. 12h6M e superfície adiabática.	22
Fig. 21 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para o segundo ano de funcionamento.	23
Fig. 22 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para o vigésimo ano de funcionamento.	23
Fig. 23 - Gráficos de dispersão referentes ao clima de Lisboa, para A. segundo ano de funcionamento e B. vigésimo ano de funcionamento e superfície com convecção e absorção solar.	24
Fig. 24 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Compact Pipes</i>	25
Fig. 25 – Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Distant Pipes</i>	25
Fig. 26 - Representação esquemática do A. modelo analítico e B. do modelo de simulação <i>Type 460</i> , b).....	26

Fig. 27 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície Adiabática, com fluxo de 200m ³ /h e 400m ³ /h.	27
Fig. 28 – Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Distant Pipes</i> e superfície Adiabática, com fluxo de 200m ³ /h e 400m ³ /h.	27
Fig. 29 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície com convecção, com fluxo de 200m ³ /h e 400m ³ /h.	28
Fig. 30 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Distant Pipes</i> e superfície com convecção, com fluxo de 200m ³ /h e 400m ³ /h.	28
Fig. 31 – Esquema representativo das resistências térmicas em consideração.....	30
Fig. 32– Atenuação da temperatura no solo em função da distância à superfície.	30
Fig. 33 - Variação do fator de atenuação A. diário e B. anual com a profundidade para a geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície adiabática.	31
Fig. 34 – Variação do fator de atenuação A. diário e B. anual com a profundidade para a geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície com convecção.	31
Fig. 35 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície com convecção e absorção solar.	32
Fig. 36 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria <i>Distant Pipes</i> e superfície com convecção e absorção solar.	32
Fig. 37 - Temperatura média diária e análise de Fourier para superfície com convecção e absorção solar, para o clima de Lisboa.....	33
Fig. 38 - Temperatura média diária e análise de Fourier para superfície com convecção e absorção solar, para o clima de São Paulo.....	33
Fig. 39 - Temperatura média diária e análise de Fourier para superfície com convecção e absorção solar, para o clima de Genebra.	33
Fig. 40 – Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima Virtual, geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície adiabática.	34
Fig. 41 - Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima de Lisboa, geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície adiabática.	35
Fig. 42 – Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima de Genebra, geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície adiabática.	35
Fig. 43 - Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima de São Paulo, geometria <i>Compact Pipes</i> e superfície adiabática.	35
Fig. 44 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento a fluxo 24h12M.	36
Fig. 45 - Temperatura média diária e temperatura média ambiente do período de funcionamento a fluxo 24h6M.	36
Fig. 46 - Temperatura média diária e temperatura média ambiente do período de funcionamento a fluxo 12h12M.	36
Fig. 47 - Temperatura média diária e temperatura média ambiente do período de funcionamento a fluxo 12h6M.	37
Fig. 48 - Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima Virtual, geometria <i>Distant Pipes</i> e superfície adiabática.....	37
Fig. 49 - Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima de Lisboa, geometria <i>Distant Pipes</i> e superfície adiabática.	38
Fig. 50 – Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima de Genebra, geometria <i>Distant Pipes</i> e superfície adiabática.	38
Fig. 51 - Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima de São Paulo, geometria <i>Distant Pipes</i> e superfície adiabática.	38

Fig. 52 – Traçado da tubagem entre o poço de admissão de ar e o edifício. Identificação dos tubos em funcionamento parcial (a vermelho). Fonte: [14].	40
Fig. 53 – Dados do sistema instalado no Edifício Solar XXI relativos ao funcionamento em regime parcial.	41
Fig. 54 – Simulação da temperatura do ar à saída, Tout.sim, com base na temperatura do ar exterior, Text, considerando L=15m.	41
Fig. 55 - Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura exterior, Text, considerando L=50m.	42
Fig. 56 - Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura de entrada, Tin.real, considerando L=15m.	42
Fig. 57 - Simulação da temperatura de entrada, Tout.poço, com base na temperatura exterior, Text, aproximando o poço de alimentação a um tubo.	43
Fig. 58 - Simulação da temperatura de entrada, Tin.sim, com base na temperatura exterior, Text, considerando L=35m.	43
Fig. 59 - Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura exterior, Text, considerando L=15m.	44
Fig. 60 – Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura de entrada, Tin.real, considerando L=15m.	44

Nomenclatura

a_s	m^2/s	Difusividade térmica do solo
c_a	J/K.kg	Capacidade calorífica do solo
c_s	J/K.kg	Capacidade calorífica do ar
h	$\text{W/m}^2\text{K}$	Coefficiente total de transferência de calor
h_a	$\text{W/m}^2\text{K}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção
h_s	$\text{W/m}^2\text{K}$	Coefficiente de transferência de calor por difusão
\dot{m}_a	kg/s	Fluxo de ar
r	m	Raio
r_0	m	Raio do tubo
t	s	Tempo
R_{solo}	$\text{m}^2\text{K/W}$	Resistência térmica do solo
R_{sup}	$\text{m}^2\text{K/W}$	Resistência térmica da superfície
S	m^2	Área da superfície de troca
T	$^\circ\text{C}$	Temperatura na interface ar/solo
T_a	$^\circ\text{C}$	Temperatura do ar
T_s	$^\circ\text{C}$	Temperatura do solo
T_x	$^\circ\text{C}$	Temperatura do ar à saída de um tubo de comprimento x
v_a	m/s	Velocidade do ar
x	m	Comprimento do tubo
δ	m	Profundidade de penetração
θ_{ext}	$^\circ\text{C}$	Amplitude térmica do ar ambiente
θ_{y_x}	$^\circ\text{C}$	Amplitude térmica anual do ar à saída de um tubo de comprimento x
θ_{d_x}	$^\circ\text{C}$	Amplitude térmica diária do ar à saída de um tubo de comprimento x
λ_a	W/mK	Condutividade térmica do ar
λ_s	W/mK	Condutividade térmica do solo
ρ_a	kg/m^3	Massa volúmica do ar
ρ_s	kg/m^3	Massa volúmica do solo
τ	s	Período de oscilação
ω	rad/s	Velocidade angular
ω_y	rad/s	Velocidade angular anual
ω_d	rad/s	Velocidade angular diária

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Atualmente, o tema das alterações climáticas tem sido motivo de investigação, debate e causador de alguma preocupação perante instituições governamentais, como o IPCC, ou comissões políticas, como a Comissão Europeia.

É evidente, de acordo com observações e estudos efetuados, que a temperatura média global do ar e oceano está a aumentar, provocando a aceleração do degelo e consequentemente o aumento do nível médio da água do mar, com diversos impactos, por exemplo, ao nível dos ecossistemas e zonas costeiras. Por outro lado, desde a época da revolução industrial, tem-se verificado um aumento de emissões de gases com efeito de estufa, GEE, como o dióxido de carbono, CO₂, metano, CH₄, óxido nitroso, N₂O e clorofluorcarbonetos, CFC's, observando-se o agravamento mais acentuado nos últimos anos [1]. De acordo com o relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change), e em conformidade com a maioria dos cientistas, a responsabilidade dessas alterações é atribuída à emissão de gases com efeito de estufa, com origem em atividades humanas. A energia é o sector com maior responsabilidade na emissão destes gases, sendo responsável por cerca de 80% das emissões [2].

De forma a mitigar a tendência de aumento de consumo até agora verificada, as sociedades deverão adaptar-se a medidas que permitirão a atenuação das emissões de GEE. Ainda no relatório do IPCC, que defende um desenvolvimento sustentável, relativamente ao sector energético, sugere-se um plano que visa a utilização de energias renováveis, reduzindo a dependência de fontes de energia fósseis, bem como a aposta na eficiência energética, como forma de reduzir a procura. É também sugerida a adoção de políticas nacionais que incentivem a execução das medidas propostas [1].

Em 2010, a Comissão Europeia lançou a estratégia de crescimento Europa 2020. A par do crescimento inteligente e inclusivo, o crescimento sustentável é uma das prioridades que incorporam esta estratégia [3]. Em matéria de clima e energia, foi estabelecida a meta dos «20/20/20» que consiste na redução, relativamente ao ano de 1990, em 20%, das emissões de gases com efeito de estufa, no aumento, em 20%, da produção de energia com origem em energias renováveis e na melhoria da eficiência energética também em 20% [2].

Os edifícios surgem como o maior potencial de poupança de energia e portanto, como o sector chave no alcance das metas propostas. No que diz respeito à climatização, aquecimento e arrefecimento, este sector detém uma fração importante da energia final total consumida [4], pelo que urge o desenvolvimento de tecnologias alternativas às tradicionais, que melhor satisfaçam as necessidades energéticas.

1.2. Consumo para climatização

A fração de energia para aquecimento, maioritariamente de origem não elétrica, encontra-se devidamente contabilizada, e é possível dizer que 75% da energia consumida nos edifícios é utilizada para aquecimento ambiente e água quente doméstica [4]. Por outro lado, como o arrefecimento é possível por intermédio de equipamentos elétricos (chillers, sistemas de ventilação ou outros), a energia elétrica dispensada para esses equipamentos encontra-se incluída no consumo total de eletricidade nos edifícios, sendo complexa a sua monitorização individual [5]. Desta forma, o consumo elétrico nos edifícios é analisado como um indicador das necessidades de arrefecimento, de onde se

pode extrapolar o consumo efetivo, na medida em que o aumento do consumo elétrico pode indicar também um aumento das necessidades de arrefecimento. O gráfico da Fig. 1, reproduzido com base em dados do Eurostat, mostra a tendência generalizada do aumento do consumo elétrico, e consequentemente das necessidades de arrefecimento.

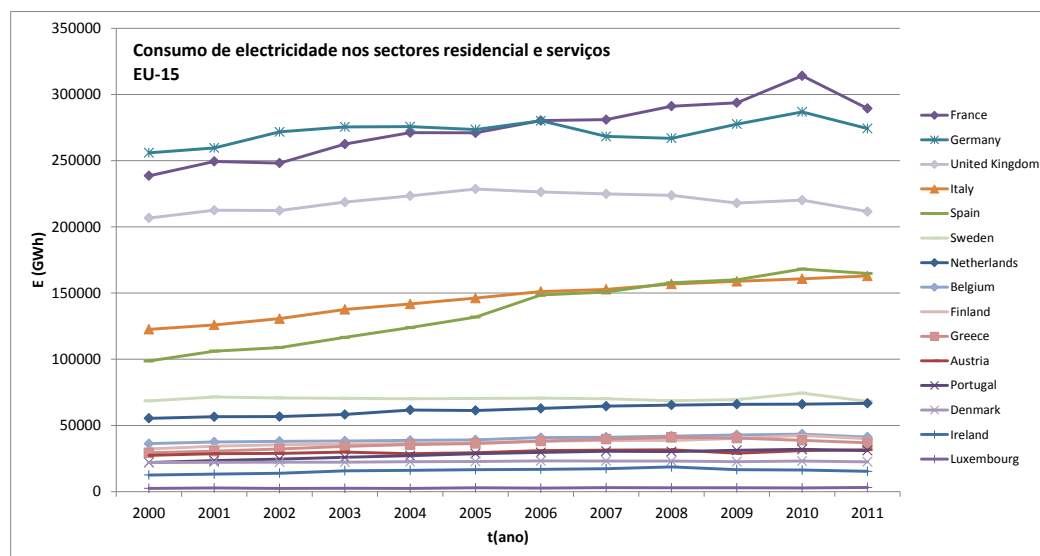


Fig. 1 - Evolução do consumo de eletricidade nos setores residencial e de serviços. Fonte: Eurostat [6]

Para fazer face a esta tendência de consumo energético e alcançar as metas propostas pela Comissão Europeia, é prioritária a aposta em tecnologias de produção de frio e calor capazes de responder às necessidades de consumo: baseadas em fontes renováveis e/ou com melhores desempenhos energéticos. Associado a este paradigma surge o conceito de *nearly zero energy building* (nZEB), que corresponde a um edifício com desempenho energético bastante elevado e cujas necessidades energéticas, quase nulas, deverão ser satisfeitas a partir de fontes de energias renováveis, e deverão ser produzidas, preferencialmente, no local ou próximo do local de consumo [7]. A obtenção de um nZEB depende fortemente da eficaz conciliação de medidas de eficiência energética com a produção de energia a partir de fontes renováveis.

1.3. Tecnologias de aquecimento e arrefecimento

Diversas tecnologias com base em energias renováveis, capazes de satisfazer as necessidades de aquecimento e arrefecimento, têm sido desenvolvidas melhorando o desempenho energético dos edifícios. De todas as fontes alternativas destacam-se três a partir das quais é possível obter diretamente calor e frio: energia solar térmica, biomassa e energia geotérmica [4].

A energia solar é uma das fontes que tem tido uma crescente utilização nos últimos tempos. O seu aproveitamento pode fazer-se de modo ativo ou passivo.

A energia solar ativa recorre a painéis solares, que funcionam como intermediários no processo de transferência de calor. Pode-se produzir água quente sanitária, que é utilizada no edifício e também, acoplando coletores solares a chillers de absorção, é possível a produção de frio para climatização do edifício.

Relativamente à energia solar passiva, esta relaciona-se diretamente com o *design* do edifício. Compreende, por exemplo, o aproveitamento da luz natural e o controlo de ganhos solares através de

dispositivos de sombreamento (potenciar a captação no inverno e promover o sombreamento no verão).

A biomassa advém da energia acumulada nos resíduos orgânicos seja de origem animal ou vegetal. De acordo com o processo de transformação, digestão anaeróbia, pirólise, combustão, gasificação ou fermentação, pode-se obter calor, eletricidade ou combustível.

Para aplicações em edifícios, o processo com maior potencial é a utilização da biomassa em centrais de cogeração e até mesmo de trigeriação, associadas a redes de distribuição de frio e calor, nas quais, com o máximo aproveitamento da energia disponível, se obtêm altas eficiências, a rondar os 85%.

Comparativamente às restantes fontes renováveis, a biomassa tem a grande vantagem de poder ser armazenada por longos períodos de tempo.

A par da energia solar e da biomassa, a energia geotérmica é também uma hipótese de substituição de fontes energéticas convencionais. Resulta da transferência de calor do interior da Terra para a superfície, oriundo do decaimento de isótopos radioativos. Esta fonte alternativa é subdividida em dois grupos, dependendo da temperatura a que o fluido se encontra: alta ou baixa entalpia.

Os recursos de alta entalpia, a temperaturas superiores a 150°C, encontram-se normalmente a grandes profundidades e têm como finalidade a produção de eletricidade. O calor remanescente deste processo de produção, a par dos recursos de baixa entalpia encontrados em zonas pouco profundas, pode ser aproveitado para redes urbanas de distribuição de calor ou aquecimento de piscinas.

Por outro lado, ao nível do solo podem-se encontrar temperaturas mais baixas, que se aproximam da média da temperatura ambiente de determinado local. Resultam, não do fluxo de calor proveniente do interior da Terra, mas do armazenamento de energia resultante das variações diárias e anuais de temperatura. Como o solo possui uma temperatura mais estável que o ar ambiente, normalmente inferior no Verão e superior no Inverno, este pode ser um mecanismo essencial no melhoramento energético do edifício.

Nos últimos anos, tem-se verificado um desenvolvimento das bombas de calor geotérmicas que funcionam acopladas a permutadores água/solo ou ar/solo [4]. Não acoplados a bombas de calor, os tubos enterrados podem funcionar por si só como sistema de ventilação passivo.

1.4. Objetivos

O trabalho desenvolvido surgiu no contexto de trabalhos de investigação anteriormente desenvolvidos [8]. Centra-se na avaliação do efeito das condições de fronteira e do caudal variável no funcionamento de um sistema de tubos enterrados, alargando o conhecimento acerca dos fenómenos associados.

Este trabalho tem como objetivo a simplificação do dimensionamento de sistemas de permutação ar/solo, de modo a contornar a necessidade de simulação. Prevê-se que seja possível estimar a resposta de um sistema, bastando para isso aplicarem-se dados de temperatura ambiente típica do local (p. ex. temperatura média diária e do período de funcionamento e temperatura média máxima diária) em conjunto com o fator de atenuação do modo de funcionamento.

Além da componente de investigação do trabalho, foi estudado o sistema de tubos enterrados instalado no Edifício Solar XXI. O estudo, tem como objetivo não só a análise de dados reais, mas também a comparação destes dados com aqueles que são adquiridos por simulação numérica, neste caso pelo modelo numérico *Type460*, incluído no *software* TRNSYS.

1.5. Estrutura

O trabalho encontra-se dividido em 9 capítulos.

No capítulo 1 é feito o enquadramento do trabalho e são referidos os objetivos do mesmo.

O capítulo 2 é dedicado aos permutadores ar/solo. É feita uma descrição geral da tecnologia, do princípio de funcionamento e também dos fatores que influenciam o desempenho do sistema.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica. Corresponde à base teórica, desenvolvida em trabalhos anteriores, que serve de suporte a esta investigação.

O capítulo 4 é reservado à metodologia seguida no trabalho. São apresentados os climas utilizados, definidos os tipos de geometria, as condições de fronteira e as variações de fluxo. Também expõe-se o modo como são obtidos os resultados e discute-se os modelos possíveis para o tratamento de resultados.

No capítulo 5 faz-se uma analogia entre o modelo analítico anteriormente desenvolvido e o modelo de simulação numérica.

Os resultados da investigação, recorrendo ao modelo de simulação, são apresentados no capítulos 6, onde se realiza a análise do efeito das condições de fronteira variáveis e do caudal variável.

O caso de estudo é exposto no capítulo 7, onde se caracteriza o sistema, apresenta-se a metodologia utilizada para a análise de dados e mostram-se os resultados obtidos.

Por fim, o capítulo 8, é dedicado às conclusões.

2. Permutadores Ar/Solo

2.1. Descrição

Os sistemas de permutação ar/solo têm o intuito de condicionar o ar exterior aproveitando o facto de o solo, devido à inércia térmica, resistir às oscilações de temperatura do ar exterior, possuindo uma temperatura que varia menos que a ambiente. Para tal, o ar exterior é insuflado, com o auxílio de ventiladores, através de um conjunto de tubos enterrados, os quais funcionam como permutadores. À cota a que os permutadores estão enterrados, no inverno, a temperatura é superior à temperatura ambiente, e no verão a temperatura é inferior, atenuando os picos de temperatura relativos à oscilação exterior.

Existem vários tipos de permutadores, entre os quais horizontais ou verticais. Esta investigação centra-se no tipo horizontal.

O uso de sistemas de permutação ar/solo é favorável em climas em que as diferenças de temperatura entre o Inverno e o Verão e também entre o dia e a noite são acentuadas, como é exemplo o clima temperado que ocorre nos países da Europa Central (França, Suíça, Alemanha, Inglaterra e Dinamarca) [9].

Uma vez que estes permutadores apenas pré condicionam o ar, são instalados normalmente associados a bombas de calor geotérmicas. O benefício do uso destes sistemas reside na diminuição da potência elétrica necessária para o arrefecimento ou aquecimento do ar. Além disso, no inverno, reduz a necessidade de recuperação de calor do ar de exaustão. O acoplamento a bombas de calor é apropriado na presença de cargas térmicas elevadas, pois os níveis de fluxo necessários são elevados.

Os sistemas de tubos enterrados, sem bomba de calor, podem ser utilizados individualmente, como sistema de ventilação passivo, ou em conjunto com outros sistemas de ar condicionado. Também podem ser utilizados em simultaneidade com outras estratégias, como a ventilação noturna (natural ou mecânica), piso radiante ou controlo de ganhos solares.

Como sistema de ventilação passivo, proporciona uma melhoria do conforto térmico. Porém, é apenas possível em casos em que não há a obrigação de cumprimento de determinada potência pré-definida de arrefecimento/aquecimento. A sua instalação é apropriada em escritórios sem grande nível de cargas internas ou em edifícios residenciais e associa-se a sistemas de ventilação natural ou mecânica que funcionam a baixo fluxo [9].

2.2. Solo

O solo, com papel fundamental na atenuação da oscilação de temperatura, possui uma forte influência no desempenho do sistema. De modo a proporcionar um melhor desempenho térmico, o solo deverá apresentar uma elevada inércia térmica, o que se traduz num solo húmido e pesado [9]. Conjuntamente, os tubos deverão ser de um material de elevada condutividade, como o betão, de forma a favorecer as trocas térmicas.

2.3. Distribuição da tubagem

A distribuição da tubagem obedece a certos parâmetros para minimizar a interferência da temperatura exterior. É importante instalar o sistema a uma profundidade adequada. Quanto maior a profundidade,

menor o efeito da temperatura ambiente. Porém, questões técnicas defendem que o aumento da profundidade é benéfico mas apenas até certo valor [10]. Este assunto irá ser explicado no capítulo 3.

Outro parâmetro a ter em conta é a distância entre os tubos. Esta deverá assumir um valor mínimo, como forma de evitar interferência, embora, tal como ocorre para a profundidade, ultrapassar uma dada distância não traga benefício para o sistema [10].

Além da profundidade e da distância entre tubos, é também importante analisar o posicionamento da rede de tubos. Estes podem estar situados em baixo do edifício ou ao lado do mesmo. No entanto, sempre que haja área disponível, devem ser colocados ao lado do edifício, de modo a que contacte apenas com o solo. Assim minimiza-se a influência das zonas do edifício mais próximas da tubagem, que podem estar climatizadas.

2.4. Admissão de ar

A escolha da localização da admissão de ar deve ser cuidada uma vez que influencia diretamente a qualidade do ar.

A admissão de ar deve ocorrer a alguns metros acima do solo de modo a prevenir a contaminação do ar por partículas suspensas e a insuflação de gases de exaustão. Além disso, como forma de diminuir a temperatura de entrada, deve-se evitar zonas com elevada exposição solar, preferindo-se locais sombreados por vegetação. Um especial cuidado deve ser dado à possível obstrução por pássaros e pequenos animais com a colocação de filtros apropriados.

2.5. Manutenção

Em termos de manutenção, os permutadores ar/solo, geralmente, não necessitam de grande atenção. De acordo com inspeções levadas a cabo, não ocorrem marcas de obstrução e é obtida uma boa qualidade de ar. É apenas necessária uma especial atenção para casos em que há infiltração de água, de modo a evitar a corrosão. Relativamente aos filtros utilizados, estes devem ser monitorizados com vista à deteção de perdas de carga e obstrução e devem ser limpos ou trocados sempre que necessário.

3. Modelos Matemáticos

A transferência de calor com um meio sólido e não homogêneo, como o solo, induz não só uma atenuação de temperatura, mas também um desfasamento relativamente à temperatura ambiente, que são difíceis de prever intuitivamente. Em particular, no caso dos permutadores ar/solo, a precisão da previsão do seu desempenho depende do conhecimento dos fenómenos físicos subjacentes ao seu funcionamento. No sentido de melhorar estes conhecimentos, tem sido desenvolvida alguma investigação, na qual se centra esta revisão bibliográfica.

3.1. Modelos Analíticos

O dimensionamento de permutadores ar/solo baseia-se, geralmente, em modelos estáticos de transferência de calor. São modelos fáceis de aplicar que implicam diversas simplificações e apenas estimam parâmetros fundamentais tais como: coeficiente de troca de calor e temperatura efetiva do solo. Aplicam-se a regimes de funcionamento considerados estacionários, não sendo evidente a sua utilização em regimes transitórios.

No sentido de melhorar a compreensão dos fenómenos de transferência de calor em jogo neste tipo de sistemas, foi desenvolvido um modelo analítico de dimensionamento [8]. Este modelo permite considerar a fronteira como adiabática mas também como isotérmica. Por outro lado, é necessário assumir que o sistema funciona a fluxo de ar constante e que é submetido a uma oscilação sinusoidal de temperatura na entrada de um tubo cilíndrico. Assume-se também, que o tubo está embutido numa camada de solo cilíndrica e radialmente finita, como mostra a Fig. 2.

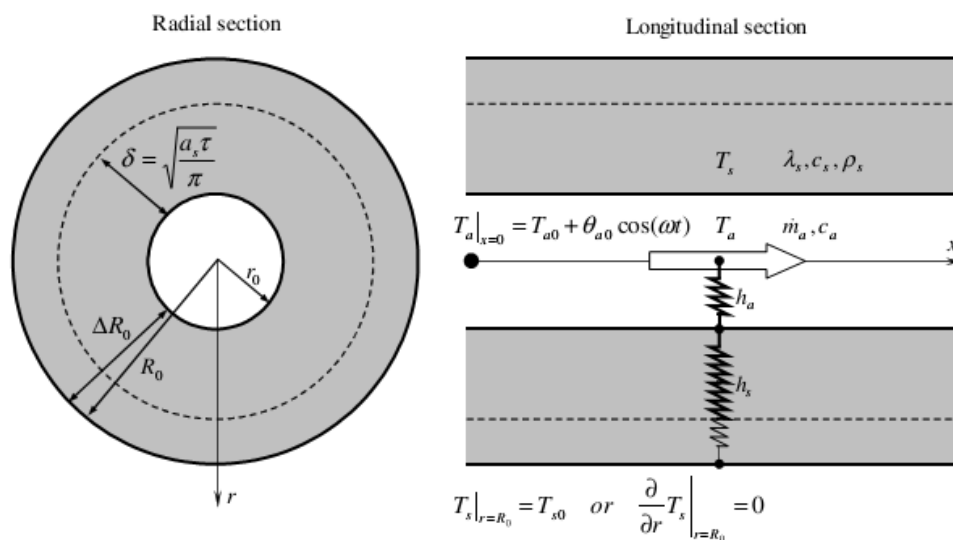


Fig. 2 – Esquema de transferência de calor para um permutador ar/solo cilíndrico. Fonte: [11].

Este modelo supõe a homogeneidade de cada secção. No entanto, compensando a real heterogeneidade ar/solo, é definido um coeficiente de transferência de calor por convecção que apesar, de não ser definido detalhadamente, representa uma equivalência que deverá manter-se constante ao longo do comprimento do tubo. Considera-se que o perfil de velocidade é constante e que a condutividade e capacidade térmica do solo são também constantes e homogêneas, desprezando-se as variações no tipo de solo e conteúdo de água. Despreza-se também a espessura do tubo. Contudo, esta pode ser tida em

conta através de duas estratégias: inclusão da condutividade no coeficiente de transferência de calor convectivo ou definição de um raio de solo que tem em conta a capacidade térmica do tubo. Supõe-se que não existem trocas de calor latente. [11]

Em termos matemáticos, o modelo analítico desenvolvido baseia-se na equação de difusão de calor, em coordenadas cilíndricas, equação 1, transferência de calor por convecção, equação 2, e no balanço energético na interface ar/solo, equação 3 [11].

$$a_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) = \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (1)$$

$$c_a \dot{m}_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{1}{v_a} \frac{\partial T_a}{\partial t} \right) = 2\pi r_0 h_a (T_s|_{r=r_0} - T_a) \quad (2)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = h_a (T_s|_{r=r_0} - T_a) \quad (3)$$

O modelo analítico resultante assenta em três parâmetros fundamentais: a profundidade de penetração, δ , o amortecimento de temperatura ao longo do tubo, T_x , e o coeficiente de amortecimento, h [10].

A onda de carga e descarga de calor propaga-se até determinada espessura de camada de solo, existente ao redor do tubo. A referida espessura é designada por profundidade de penetração e depende do período de oscilação associado ao sinal que traduz a temperatura exterior. Calcula-se da seguinte forma:

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda_s \tau}{c_s \rho_s \pi}} \quad (4)$$

Para um tipo de solo com condutividade $\lambda_s = 1.9 \text{ W/Km}$ e capacidade $c_s \rho_s = 1.9 \text{ MJ/Km}^3$, valores tomados como referência ao longo deste trabalho, a atenuação da onda diária necessita de aproximadamente 17cm e a anual de 3m ao redor de cada tubo [10].

$$\delta_{day} = 17 \text{ cm} \quad (5)$$

$$\delta_{year} = 3 \text{ m} \quad (6)$$

É importante referir que o dimensionamento do sistema depende fortemente do objetivo do mesmo. Se se pretende apenas a atenuação dos picos diários da temperatura do ar ambiente, é necessário garantir que cada tubo possui apenas 17cm de solo em seu redor. Por outro lado, se o objetivo é atenuar a oscilação anual da temperatura, são necessários 3m ao redor de cada tubo, o que se traduz num maior potencial de arrefecimento/aquecimento mas com a utilização de maior volume de solo.

Graças ao armazenamento de calor por difusão, a temperatura ambiente, descrita por um sinal sinusoidal, do ar que entra no tubo é atenuada ao longo do mesmo. Este amortecimento é exponencial e representado pela equação seguinte, que permite, num determinado instante t , o cálculo da temperatura do ar, T_x , à saída de um tubo de comprimento x [10].

$$T_x = \theta_{ext} \sin(\omega t) \exp\left(-\frac{Sh}{c_a \dot{m}_a}\right) \quad (7)$$

O coeficiente h corresponde ao fator de atenuação e resulta de uma relação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção, h_a e o coeficiente de transferência de calor por difusão, h_s [10]:

$$h \approx \frac{h_a h_s}{h_a + h_s} \quad (8)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h_a , é dado pela fórmula simplificada da relação de Gnielinski [10], que depende do número de Reynolds, Re , e do número de Prandtl, Pr .

$$h_a = \frac{\lambda_a}{2r} 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} \quad (9)$$

O coeficiente de transferência de calor por difusão, h_s , depende da espessura da camada de solo disponível para armazenamento e, consequentemente, depende do tipo de geometria [10]. Assim, no caso da geometria Compact Pipes, é possível aproximar o problema a um modelo plano, equação 10, contrariamente à geometria Distant Pipes em que é aplicável apenas o modelo cilíndrico, equação 11.

$$h_s \approx \frac{\lambda_s}{\delta} \quad (10)$$

$$h_s \approx \frac{\lambda_s}{r \ln \left(1 + \frac{\delta}{r} \right)} \quad (11)$$

Considerando que existe oscilação anual e diária, a equação 7 é equivalente à equação seguinte.

$$T_x = \theta_{ext_y} \sin(\omega_y t) \exp \left(-\frac{S_y h_y}{c\dot{m}} \right) + \theta_{ext_d} \sin(\omega_d t) \exp \left(-\frac{S_d h_d}{c\dot{m}} \right) \quad (12)$$

3.2. Modelos Numéricos

Na literatura é possível encontrar uma grande quantidade de modelos numéricos que permitem simular permutadores ar/solo [8]. Os modelos de simulação numérica surgem como alternativa aos modelos analíticos, dada a complexidade da resolução dos mesmos e pela necessidade de obter dados, próximos da realidade, que permitem compreender o comportamento real dos sistemas.

O modelo utilizado ao longo deste trabalho, e desenvolvido em [8], é o mais completo e inovador pois, pela primeira vez, trata, em conjunto, as trocas de calor latente e sensível entre o fluxo de ar e o tubo, bem como, as perdas de carga e a difusão térmica no solo, tridimensionalmente. Além disso, permite o controlo da direção do fluxo, o que pode ser útil em caso de funcionamento em circuito fechado.

Neste modelo, os *inputs* e *outputs* são criados de modo flexível e controlado. É permitida a simulação de várias geometrias, definição das características de funcionamento (exemplo: características do solo e tubagem), que não são necessariamente homogêneas apesar de constantes temporalmente, e a aplicação de condições fronteira variáveis, ainda que se trate da mesma superfície. Desenvolvido com base no método das diferenças finitas, a malha ortogonal, tridimensional, poderá ter nós de diferentes larguras e portanto adaptável a cada problema. De referir que os tubos circulares são representados por quadrados equivalentes, com o cuidado de manter idêntica a superfície de troca [8].

O referido modelo foi adaptado ao ambiente do *software* TRNSYS, software modular e muito utilizado para simulações dinâmicas, através do módulo *Type 460*.

4. Metodologia

Para avaliar o efeito das condições de fronteira e do caudal variável no desempenho de um sistema de tubos enterrados recorreu-se a um conjunto de simulações correspondente a vários modos de funcionamento. Estas simulações abrangeram vários climas, diferentes configurações do sistema, vários períodos de funcionamento e vários tipos de condições de fronteira.

4.1. Climas analisados

Independentemente do fator em estudo, consideraram-se três climas típicos distintos: Lisboa (Portugal), Genebra (Suíça), e São Paulo (Brasil) cuja localização está representada na Fig. 3.

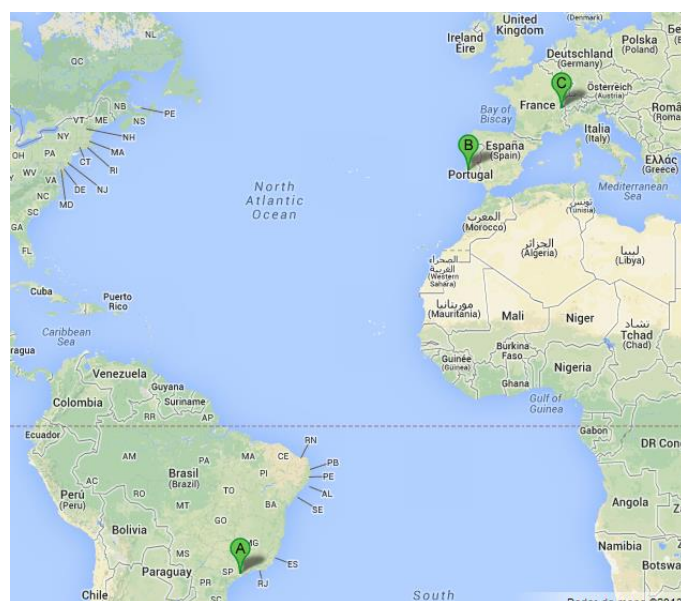


Fig. 3 – Localização dos climas típicos: São Paulo (A), Lisboa (B), Genebra (C).

Além dos climas típicos é também considerado um clima designado por clima virtual, o qual corresponde a uma função sinusoidal e que funciona como base para os resultados que se espera obter.

Na Fig. 4 estão representados os perfis anuais das temperaturas médias diárias para os climas escolhidos.

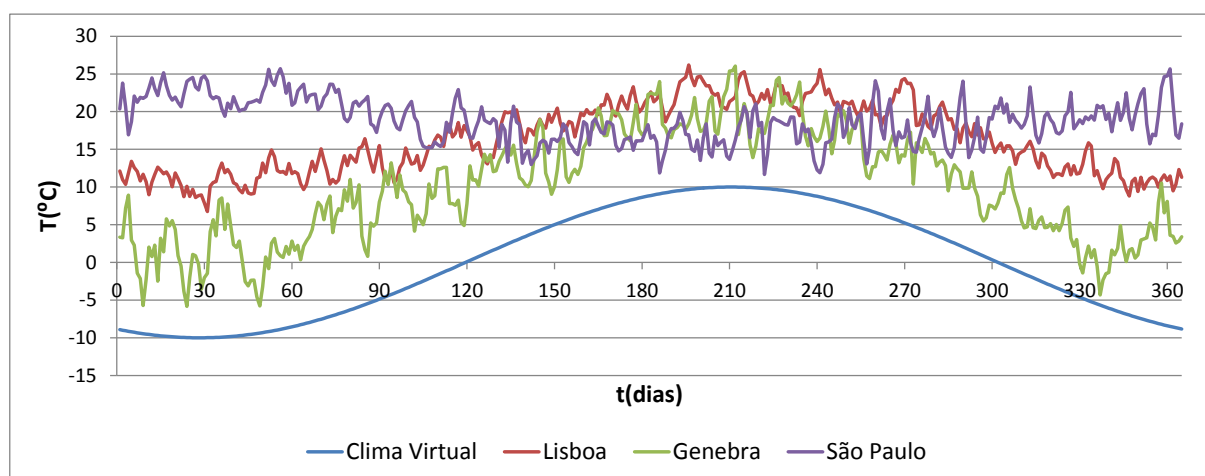


Fig. 4 – Perfil de temperaturas médias diárias para os climas típicos (Lisboa, Genebra e São Paulo) e para o clima virtual.

O clima de Genebra possui uma amplitude térmica anual maior que a do clima de Lisboa, facto que explica a sua escolha. Contrariamente, o clima do Brasil apresenta fraca amplitude anual, razão pela qual este clima foi também seleccionado.

Na tabela seguinte encontra-se a caracterização dos climas em termos de temperatura média e radiação solar.

Tabela 1 – Caracterização dos climas em estudo

Região	Temperatura Média Anual (°C)	Radiação Solar (MWh/m ² /ano)	Fonte
Clima Virtual	0	0	-
Lisboa	16.3	1.6	EnergyPlus, Weather Data[12]
Genebra	10	1.2	EnergyPlus, Weather Data[12]
São Paulo	18.8	1.5	EnergyPlus, Weather Data[12]

Avaliando os diferentes climas é possível verificar algum tipo de relação ou independência entre os resultados obtidos e os fatores climáticos.

4.2. Tipos de geometria

Definiram-se dois tipos de geometria, *Compact Pipes* e *Distant Pipes*, Fig. 5, que diferem na distância interaxial e na profundidade a que os tubos estão enterrados. Analisando as diferentes geometrias é possível verificar o efeito da disponibilidade de solo no desempenho do sistema.

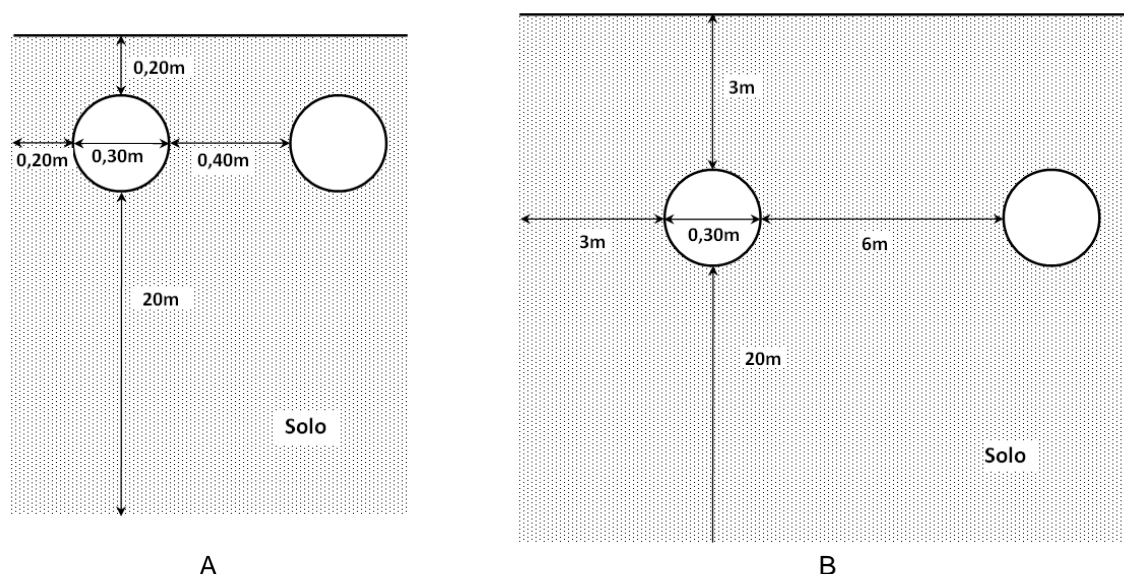


Fig. 5 – Esquema representativo das duas geometrias utilizadas: **A.** geometria *Compact Pipes* e **B.** geometria *Distant Pipes*. Os esquemas não estão à escala.

4.3. Superfícies

Neste trabalho consideraram-se três tipos de condições de fronteira para a superfície superior do solo (em contacto com o ar ambiente):

- Superfície adiabática;
- Superfície com convecção sem absorção solar;
- Superfície com convecção com absorção solar.

Para verificar o seu efeito, simulou-se o sistema para cada uma das geometrias acima referidas, variando as condições de fronteira, mas mantendo o fluxo constante (24h/dia durante 12 meses).

4.4. Fluxos

A análise do efeito do caudal variável assenta na simulação de vários modos de funcionamento, em termos de fluxo contínuo e descontínuo, mantendo a superfície adiabática.

Consideraram-se quatro casos distintos:

- Fluxo constante (24h/dia) durante 12 meses: 24h12M;
- Fluxo constante (24h/dia) durante 6 meses: 24h6M;
- Fluxo descontínuo (12h/dia) durante 12 meses: 12h12M;
- Fluxo descontínuo (12h/dia) durante 6 meses: 12h6M.

É importante referir que os períodos de funcionamento são centrados nas horas e meses mais quentes: 15h e 1 de Agosto, respetivamente. Além disso, fez-se variar a intensidade de fluxo: 200 m³/h e 400 m³/h por tubo para apenas um dos casos (24h12M).

4.5. Obtenção de resultados

Como ferramenta de simulação recorreu-se a um algoritmo numérico, *Type460*, integrado no *software* TRNSYS. Da simulação, além da temperatura do ar à saída dos tubos, único parâmetro utilizado neste trabalho, resultam informações sobre a humidade do ar, a potência de calor sensível e latente e a potência relativa à transferência de energia por difusão no topo. Os resultados das simulações são consideráveis a partir do segundo ano de funcionamento do sistema uma vez que, o primeiro ano é considerado como um ano de transição, do qual não é ainda possível retirar resultados aceites como estáveis.

No que diz respeito às propriedades físicas do sistema a simular, estas estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades físicas do sistema

λ_{tubo} (W/mK)	2
λ_{solo} (W/mK)	1,9
C_{vsolo} (kJ/m ³ K)	1900
$R_{\text{superfície}}$ (m ² K/W)	0,04

Como já foi referido, o sistema de tubos enterrados origina uma diferença de temperatura do ar à saída do tubo relativamente à temperatura do ar à entrada. Esta diferença é visível em gráficos tipicamente idênticos aos que estão apresentados na Fig. 6. Nestes gráficos, $T_{0Max}(t)$ e $T_{0Min}(t)$ representam as temperaturas máximas e mínimas diárias do ar à entrada do tubo e $T_{30Max}(t)$ e $T_{30Min}(t)$ à saída. Do mesmo modo, $T_{0Med}(t)$ e $T_{30Med}(t)$ correspondem às temperaturas médias diárias do ar à entrada e saída do tubo, respetivamente, e T_{0Med} corresponde à temperatura média do ar durante o período de funcionamento do sistema, neste caso, anual.

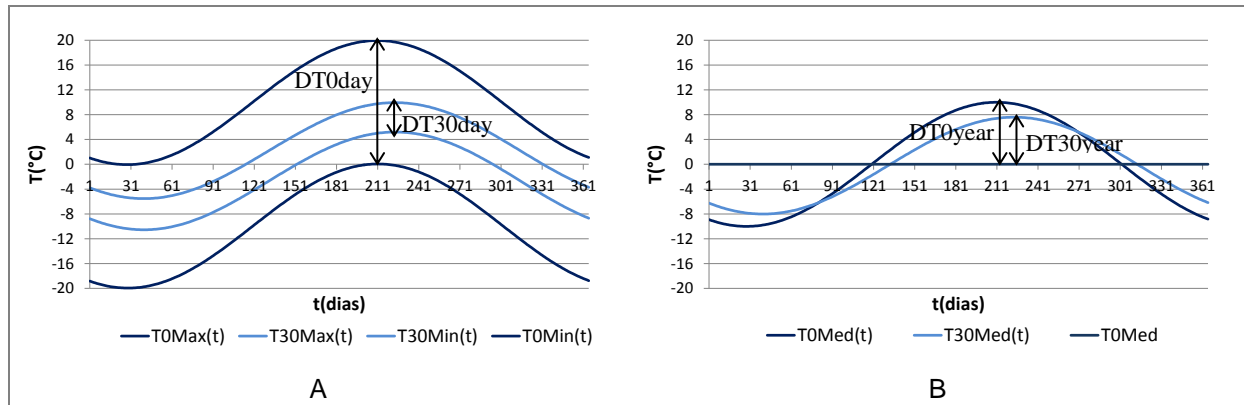


Fig. 6 – **A.** Extremos diários de temperatura do ar à entrada e saída do tubo **B.** Temperatura média diária do ar à entrada e saída de um tubo com $L=30m$.

De referir que os gráficos de extremos diários de temperatura do ar, Fig. 6A, fornecem informação acerca dos efeitos diários. Por outro lado, os gráficos de temperatura média diária do ar refletem o comportamento anual.

A relação entre a amplitude térmica do ar à entrada e à saída do tubo ($DT0$ vs $DT30$), seja em termos diários ou anuais, pode ser traduzida por uma percentagem designada, ao longo deste trabalho, por fator de atenuação. Este traduz a capacidade que o sistema apresenta em reduzir a amplitude térmica associada à temperatura do ar ambiente, sendo que, ao contrário do que seria intuitivo, um fator de atenuação de 100% resulta numa atenuação efetiva nula.

Neste estudo, o fator de atenuação é calculado por análise de Fourier ou pelo Método dos Mínimos Quadrados. Este parâmetro é crucial no decorrer desta investigação e é nele que se baseiam todas as análises efetuadas.

4.5.1. Método dos Mínimos Quadrados

Dada uma distribuição de pontos, o Método dos Mínimos Quadrados visa o ajuste do conjunto de dados a uma curva. A curva de ajuste é do tipo $y_i = mx_i + b$, em que m e b são calculados da seguinte forma:

$$m = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2} \quad (13)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (14)$$

Remetendo à Fig. 6, interessa obter a relação entre a amplitude térmica à saída do tubo, no caso $DT30$, e a amplitude térmica à entrada do tubo, $DT0$. Produzem-se gráficos de dispersão como os

apresentados na Fig. 7, em que o eixo do x corresponde à diferença de temperatura de ar à entrada do tubo e y à diferença de temperatura do ar à saída do tubo.

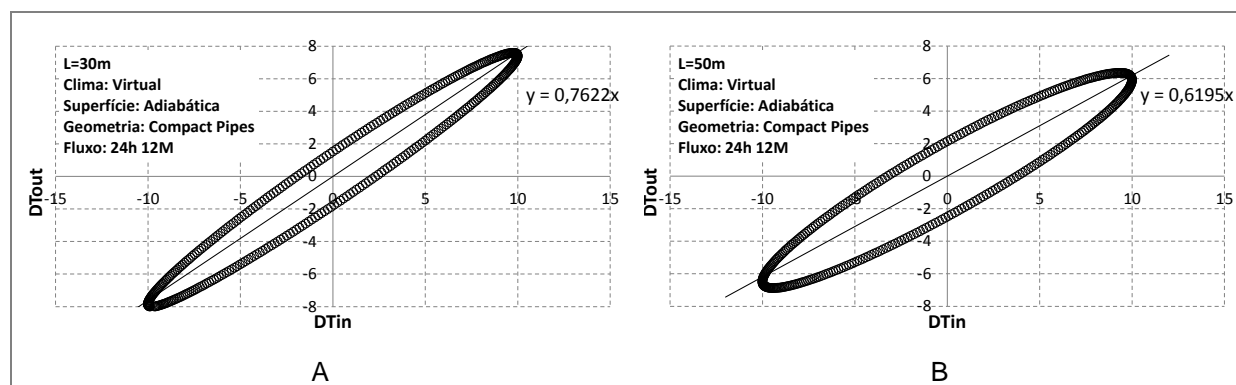


Fig. 7 – Temperatura de saída em função da temperatura de entrada para A. L=30m e B. L=50m.

Sendo b forçosamente 0, o declive obtido quantifica a relação entre as amplitudes térmicas, correspondendo ao fator de atenuação.

Para regimes de funcionamento a fluxo constante, 24h12M, o cálculo da diferença de temperatura do ar para cada instante é imediata. Corresponde à diferença entre a temperatura máxima diária e a temperatura média diária do ar, no caso da amplitude térmica diária, e à diferença entre a temperatura média diária e a temperatura média anual do ar, no caso da amplitude térmica anual, para determinado comprimento de tubo. Nestes casos, a temperatura média anual do ar à saída do tubo é aproximadamente igual à temperatura média anual do ar ambiente, como se pode verificar na Fig. 8, o que não levanta questões acerca de uma possível definição de uma temperatura média anual base a utilizar diferente daquela que seria intuitiva.

Todavia, nos casos em que o funcionamento do sistema ocorre a fluxo descontínuo, a temperatura média do ar à saída do tubo, para dado comprimento, durante o período de funcionamento, T_{xMed} deixa de ter um valor próximo da temperatura média do ar à entrada, T_{0Med} , como se pode ver confrontando a Fig. 8 com a Fig. 9, que representam, respetivamente, os perfis de temperatura média do ar em regime contínuo e descontínuo, para superfície adiabática e clima virtual.

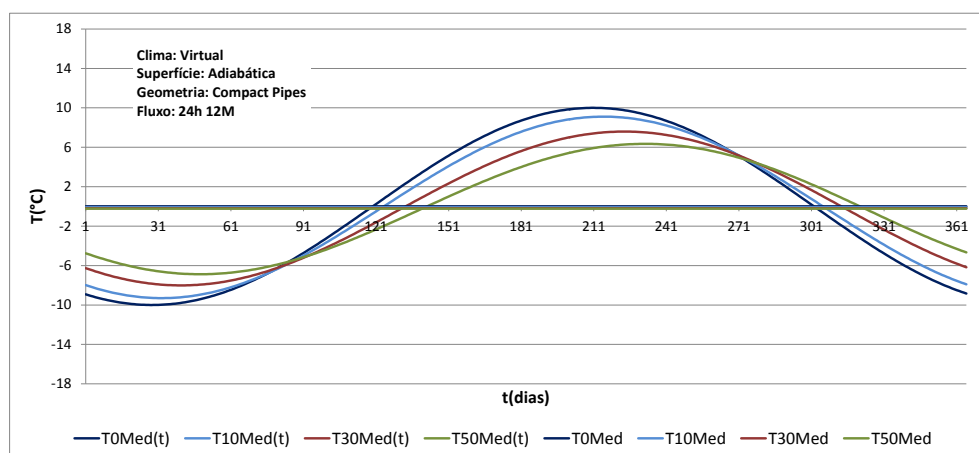


Fig. 8 - Temperatura média diária e temperatura média, durante o período de funcionamento, do ar à entrada e à saída do tubo para regime contínuo.

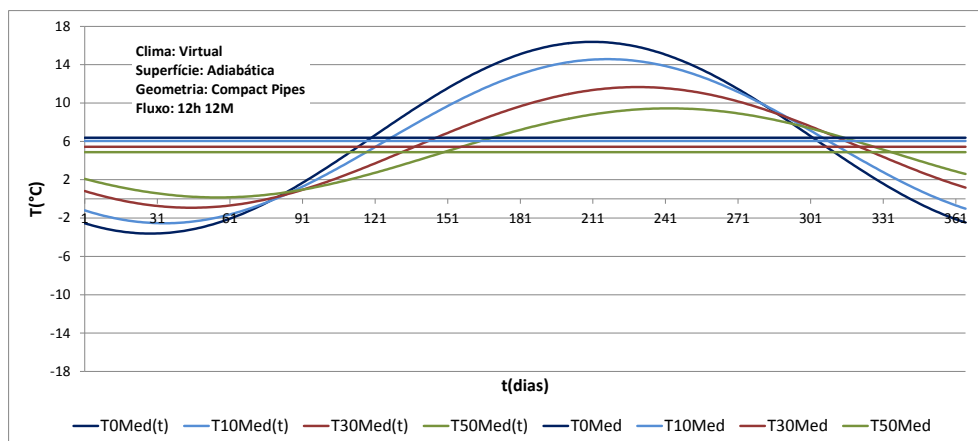


Fig. 9 - Temperatura média diária e temperatura média, durante o período de funcionamento, do ar à entrada e à saída do tubo para regime descontínuo.

Por isto, pretende-se saber se a amplitude térmica anual à saída do tubo, DT_{xyear} , deverá ser calculada relativamente a T_{xMed} , que seria a solução intuitiva, ou a $T0Med$. Compararam-se os resultados obtidos para as duas formas de cálculo, a fim de se detetarem possíveis diferenças. Testaram-se as quatro modalidades de fluxo mas considerou-se apenas a geometria *Compact Pipes*, por ser, *a priori*, aquela que apresenta maior influência do ar ambiente exterior.

Nas Fig. 10 e Fig. 11 estão representados os resultados para o clima virtual e superfície adiabática, enquanto que, nos anexos A, B e C constam os gráficos relativos aos climas de Lisboa, Genebra e São Paulo, respetivamente.

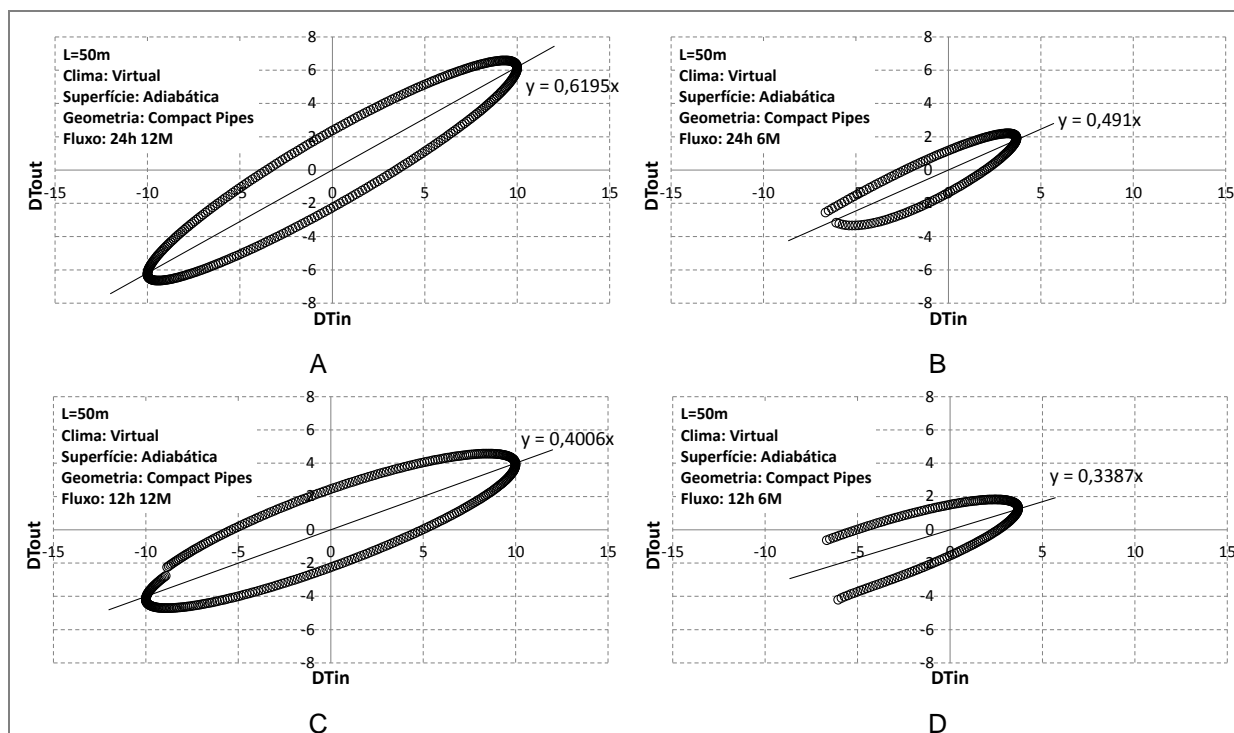


Fig. 10– Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em $T50Med$, para **A.** 24h12M **B.**24h6M **C.**12h12M e **D.**12h6M.

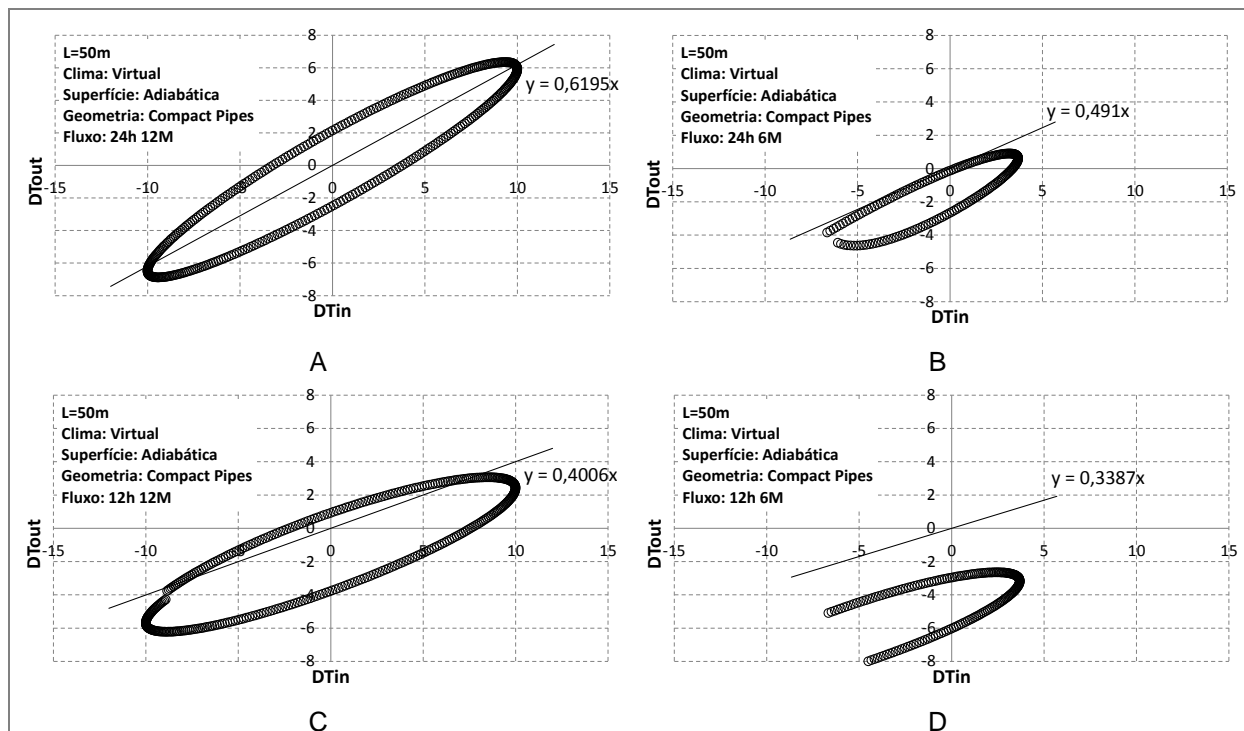


Fig. 11 – Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em T_{0Med} , para **A.** 24h12M **B.** 24h6M **C.** 12h12M e **D.** 12h6M.

Analisando os gráficos obtidos, Fig. 10 e Fig. 11, verifica-se que a variação da temperatura de base para o cálculo de DT_{xyear} apenas provoca um deslocamento no eixo vertical do conjunto de dados, uma vez que a ordenada na origem é forçosamente 0, mantendo-se o declive da reta de ajuste e consequentemente o fator de atenuação. Os resultados para os climas típicos, sustentam a mesma interpretação, comprovando a fiabilidade da mesma. Deste modo, o resultado obtido é o mesmo, quer se considere o cálculo com T_{0Med} ou com T_{xMed} . Todavia, a utilização como base da temperatura média do ar à entrada, T_{0Med} , torna-se mais prática, pois será utilizada, em conjunto com a atenuação, na previsão de $T_{xMed}(t)$ para determinado clima.

Assim, o fator de atenuação, obtido pelo Método dos Mínimos Quadrados, corresponde a:

$$fa_{yx} = \frac{DT_{out}}{DT_{in}} = \frac{T_{xMed}(d) - T_{0Med}(\text{período})}{T_{0Med}(d) - T_{0Med}(\text{período})} \quad (15)$$

$$fa_{dx} = \frac{DT_{out}}{DT_{in}} = \frac{T_{xMax}(d) - T_{0Med}(d)}{T_{0Max}(d) - T_{0Med}(d)} \quad (16)$$

4.5.2. Análise de Fourier

A análise de Fourier baseia-se na possibilidade de reconstruir um sinal periódico com a soma de funções de base sinusoidal. Para tal, através da aplicação da transformada de Fourier, é possível obter as componentes de frequência, amplitude e fase presentes na função original e assim obter as funções sinusoidais associadas. Este método, além de permitir a suavização do sinal, por filtração das altas frequências, permite a seleção de componentes de interesse.

No contexto deste estudo, a análise de Fourier é aplicada às séries anuais de temperatura do ar à saída do tubo, T_x , obtidas por simulação, e às séries anuais de temperatura do ar à entrada, T_0 , que

correspondem à temperatura do ar ambiente típica de cada um dos climas. Seleccionaram-se as frequências anuais e diárias, com o intuito de calcular as atenuações anuais e diárias, bem como a frequência de ordem 0, correspondente à temperatura média anual, $T_x Med$, e reconstruiu-se o sinal de acordo com a seguinte fórmula:

$$T_x = T_x Med + \theta_{y_x} sen(\omega_{y_x} t + \phi_{y_x}) + \theta_{d_x} sen(\omega_{d_x} t + \phi_{d_x}) \quad (17)$$

Desta forma, obtêm-se os sinais suavizados como os representados nos gráficos seguintes, que correspondem a perfis de temperatura do ar, extremos e temperatura média, para superfície adiabática, regime de funcionamento a fluxo constante e geometria *Compact Pipes* para cada um dos climas reais: Lisboa, Genebra e São Paulo, respetivamente.

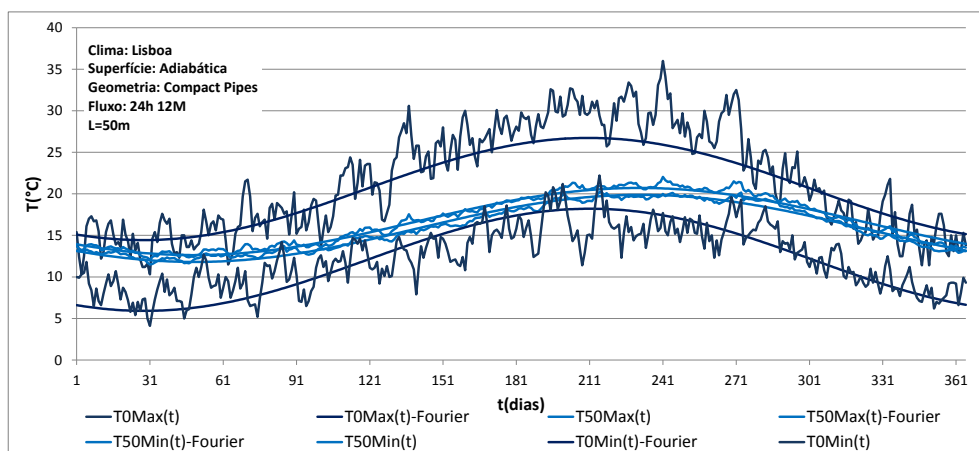


Fig. 12 - Extremos diários de temperatura do ar simulados e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Lisboa.

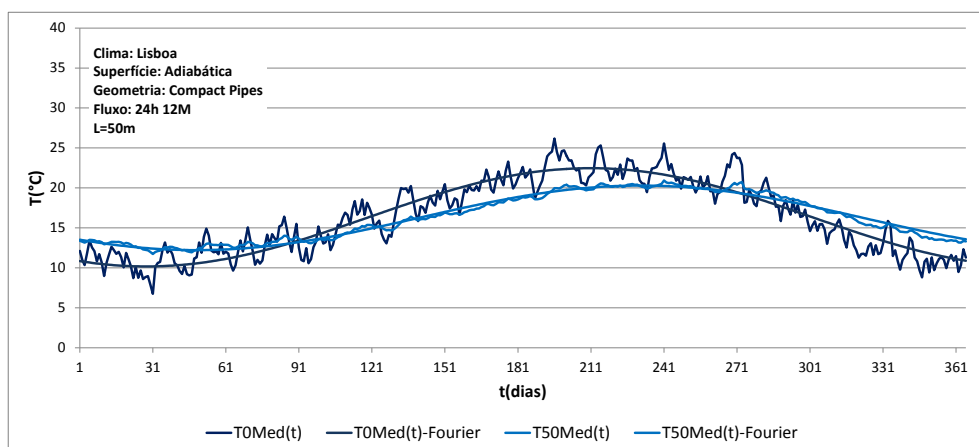


Fig. 13 – Temperatura média diária do ar simulada e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Lisboa.

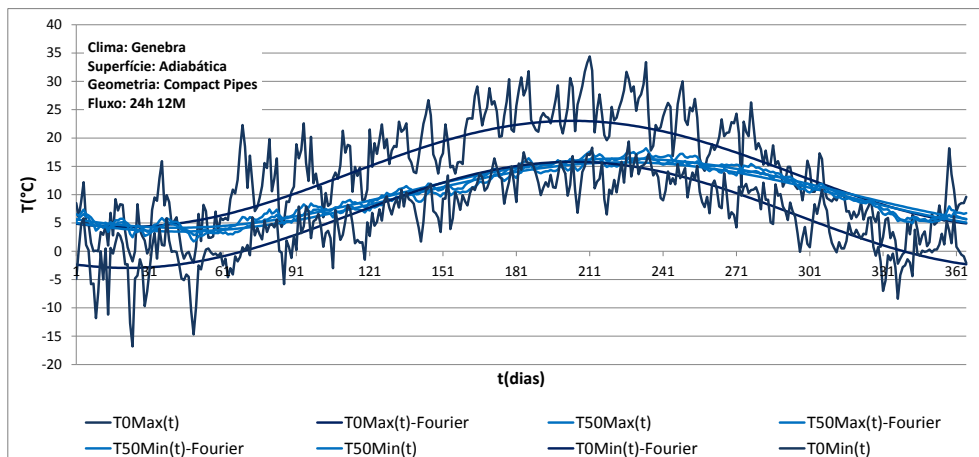


Fig. 14 - Extremos diários de temperatura do ar simulados e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Genebra.

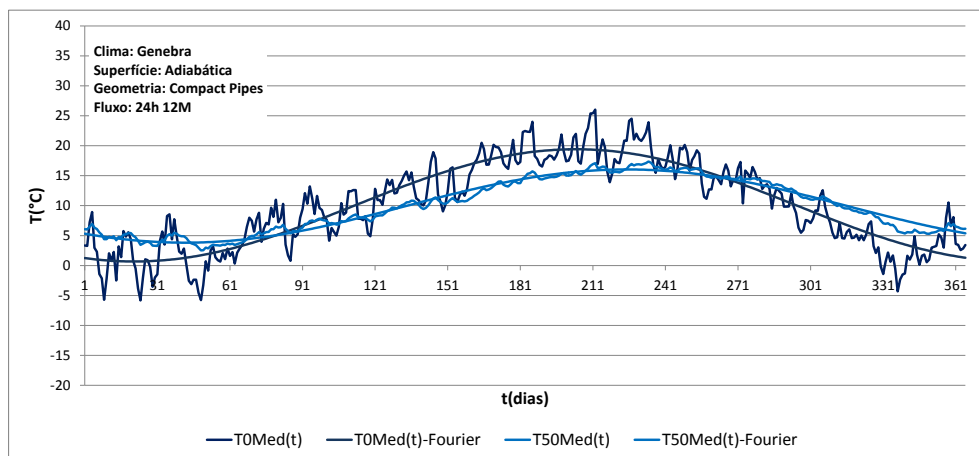


Fig. 15 - Temperatura média diária do ar simulada e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de Genebra.

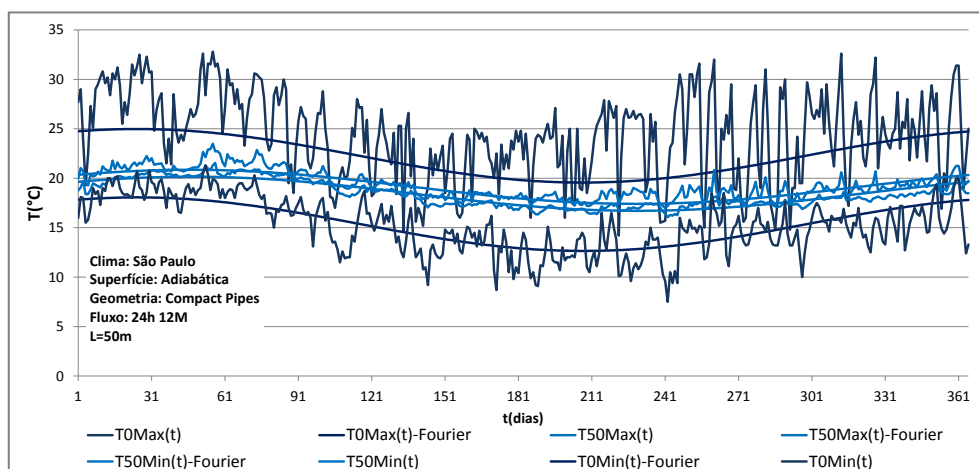


Fig. 16 - Extremos diários de temperatura do ar simulados e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de São Paulo.

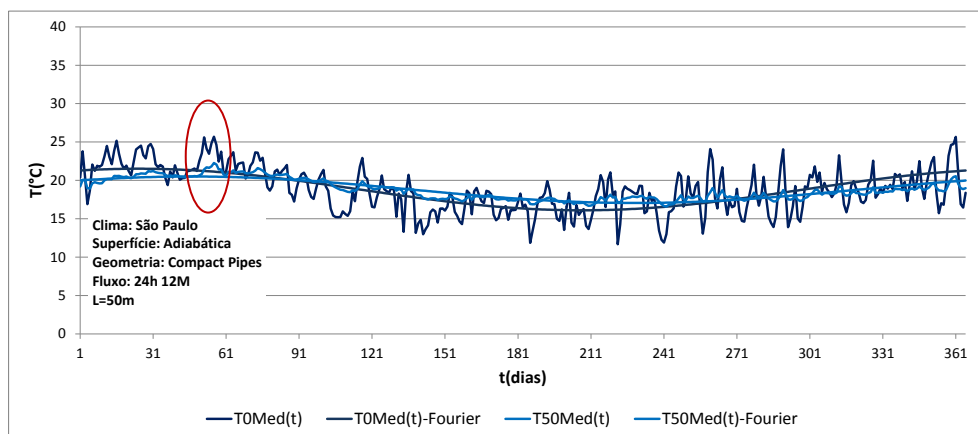


Fig. 17 - Temperatura média diária do ar simulada e por análise de Fourier com superfície adiabática, para o clima de São Paulo.

Como se pode verificar nos gráficos obtidos, ao selecionarem-se apenas as frequências anuais e diárias, os picos de temperatura são completamente eliminados. Assim, os resultados que se obtêm por este método podem afastar-se da realidade, seja por subestimação ou por sobestimação. Esta desvantagem torna-se mais notória para climas com maior amplitude entre os extremos diários, e maior oscilação na temperatura média diária do ar, como é o caso do clima de São Paulo.

Na Fig. 17, a temperatura média do ar de saída simulada para o dia 56, assinalado na figura, é de aproximadamente 22.3°C. Porém, a temperatura média estimada por análise de Fourier é de 20.5°C, o que se traduz numa diferença de aproximadamente 1.8°C. Este é um exemplo possível de subestimação. Este tipo de problema pode ser ainda mais evidente para comprimentos de tubos inferiores ao apresentado (< 50m), em que a atenuação das oscilações é menor. Para o mesmo comprimento de tubo, no caso do clima de Lisboa, podem-se verificar situações semelhantes mas que se traduzem em diferenças menos significativas do que no clima de São Paulo.

Os fatores de atenuação diários e anuais, são obtidos pelo quociente entre a amplitude anual/diária da temperatura do ar à saída de um tubo de comprimento x e a amplitude anual/diária da temperatura do ar à entrada de um tubo:

$$fa_{y_x} = \frac{\theta_{y_x}}{\theta_{y_0}} \quad (18)$$

$$fa_{d_x} = \frac{\theta_{d_x}}{\theta_{d_0}} \quad (19)$$

em que fa_{y_x} e fa_{d_x} correspondem aos fatores de atenuação anual e diário, para um comprimento x de tubo, respetivamente.

Outro método de análise possível é a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados às séries resultantes da análise de Fourier. Esta opção, em conjunto com as restantes, será analisada na secção seguinte.

4.5.3. Comparação de Métodos

A análise dos gráficos dos fatores de atenuação diária e anual, em função do comprimento do tubo, obtidos por aplicação dos vários métodos, possibilita a comparação dos métodos entre si, quer em termos de resultados práticos quer ao nível das vantagens e desvantagens.

Os resultados apresentados na Fig. 18 e na Fig. 19, derivam da simulação de um sistema de fluxo constante, com geometria *Compact Pipes* e superfície adiabática ou com convecção sem absorção de radiação solar, para os quatro climas em estudo.

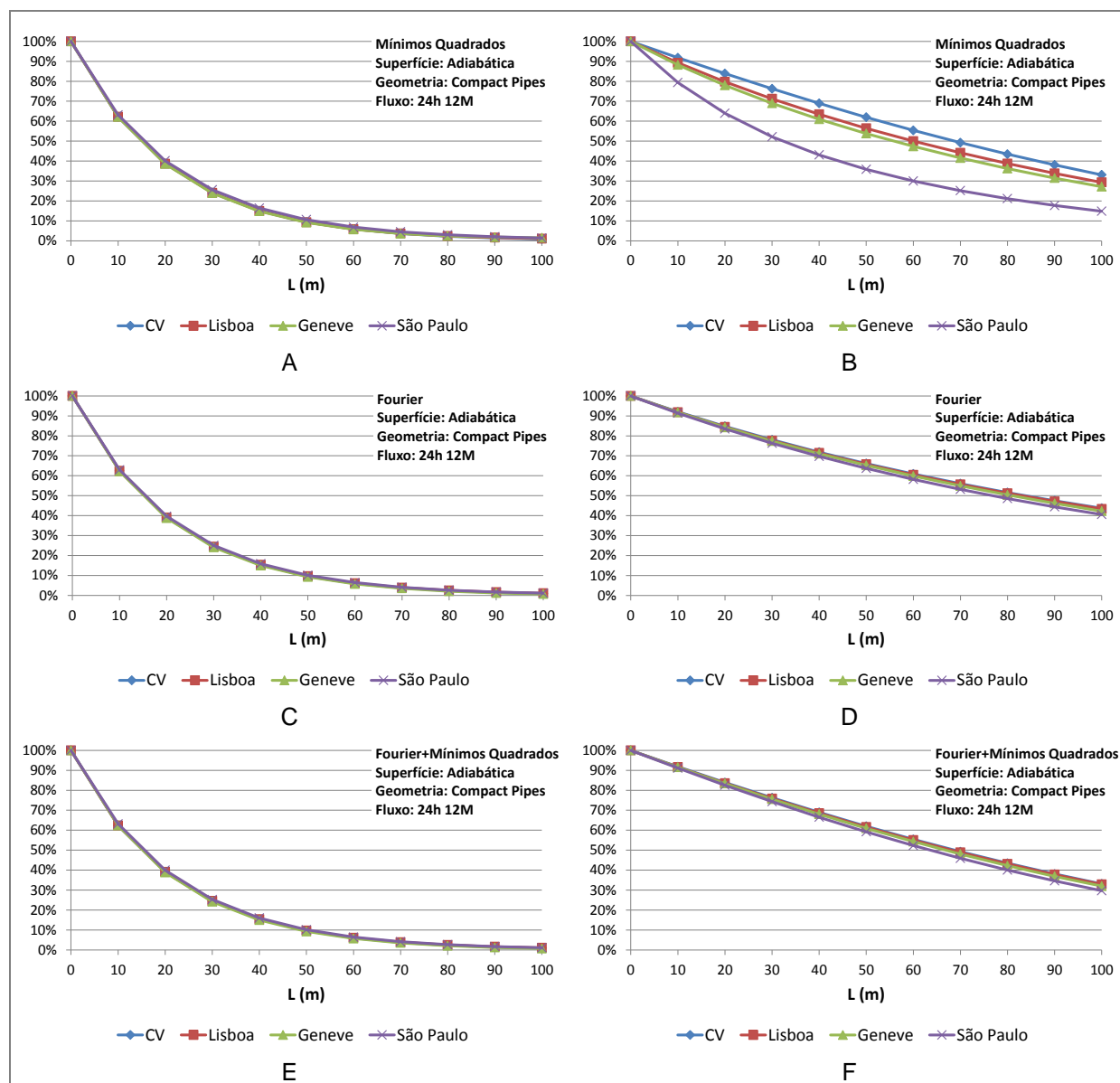


Fig. 18 – Fatores de atenuação diários (A. C. e E.) e anuais (B. D. e F.) segundo diferentes métodos, para superfície adiabática.

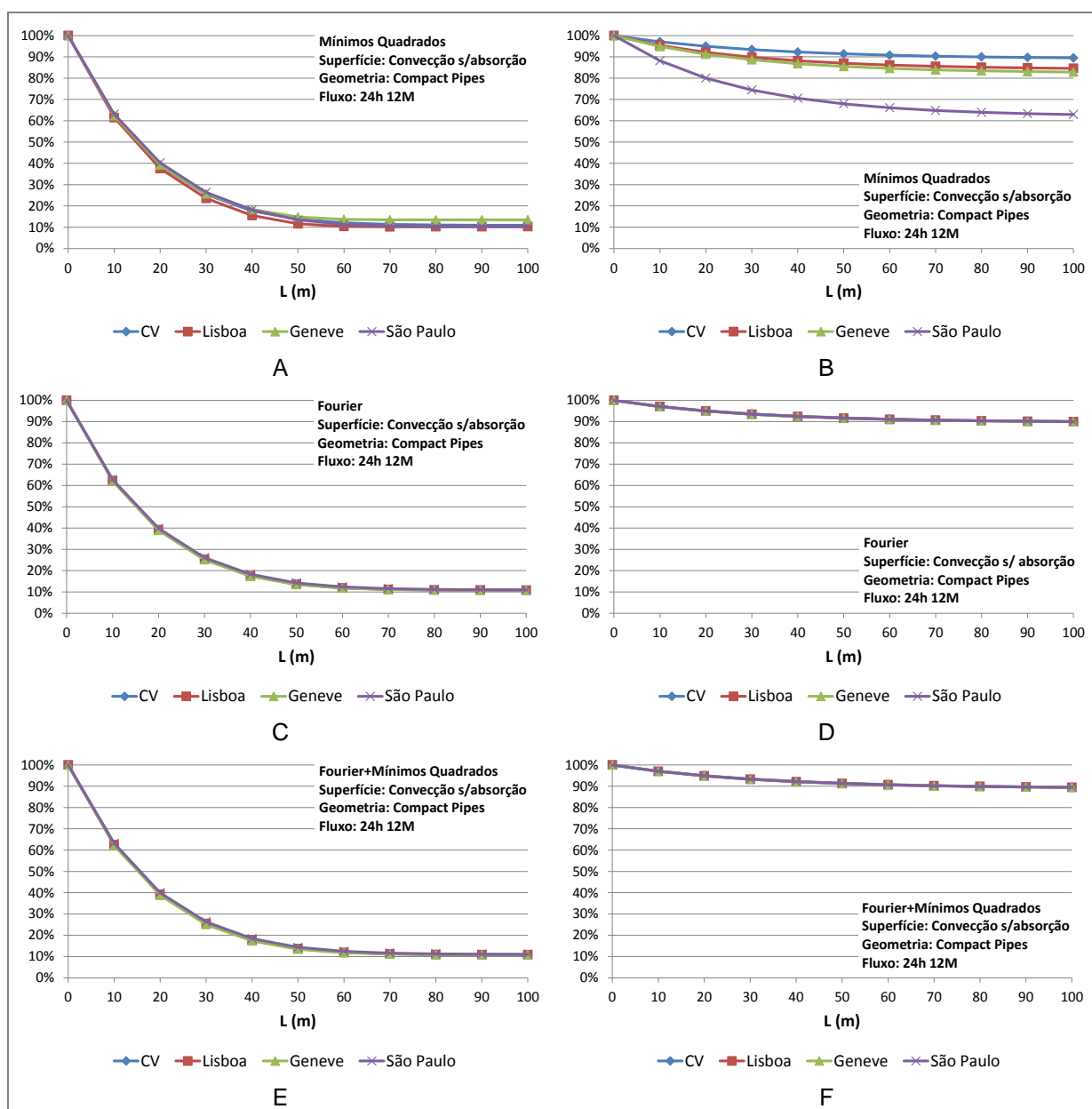


Fig. 19 - Fatores de atenuação diários (A, C, e E) e anuais (B, D, e F.) segundo diferentes métodos, para superfície com convecção sem absorção solar.

Como se pode verificar através dos gráficos obtidos, não existem diferenças significativas na atenuação diária, com recurso a qualquer um dos métodos. Deste modo, deduz-se que o cálculo da atenuação diária é independente do método.

O método de Fourier, uma vez descartadas as altas frequências, conduz à eliminação dos picos de temperatura e, portanto, à suavização total do sinal. Os resultados obtidos por este método para os fatores de atenuação anuais, Fig. 18D e Fig. 19D, aproximam-se dos resultados obtidos para o clima virtual, o que demonstra a boa representatividade do mesmo.

O método de Fourier, calculado com base apenas nas amplitudes anual e diária, equações 18 e 19, leva a que a atenuação anual não tenha em conta a diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal de saída, resultando numa sobrestimação do fator de atenuação (cf. Fig. 18B e Fig. 18D). Como forma de contornar esta desvantagem, sugere-se a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados às séries resultantes do Método de Fourier, que como se pode ver comparando a Fig. 18D com a Fig. 18F

resulta numa diferença de 10% em relação aos resultados do método de Fourier simples. É importante referir que, para o caso da superfície com convecção, Fig. 19D e Fig. 19F, não se verificam diferenças quando se utiliza o método de Fourier comparativamente ao método conjunto de Fourier e Mínimos Quadrados, uma vez que o desfaseamento entre a temperatura do ar à entrada e à saída é desprezável. Esta situação é visível nos gráficos da Fig. G1 e Fig. G2, presentes no anexo G, em que o instante em que ocorre o máximo da temperatura do ar à saída é quase coincidente com o instante em que ocorre o máximo da temperatura do ar à entrada.

O método de Fourier tem a vantagem de ser bastante intuitivo e ser relativamente simples de aplicar, uma vez que existem diversas ferramentas informáticas para o efeito. Como desvantagem, pode referir-se que é aplicável apenas a sinais contínuos no tempo, pelo que, quando existe descontinuidade no funcionamento do sistema, fluxo descontínuo, deve-se necessariamente aplicar o Método dos Mínimos Quadrados. Com o método de Fourier é ainda possível obter-se resultados independentes do clima. Esses resultados poderão vir a ser utilizados no dimensionamento dos sistemas.

4.5.4. Evolução temporal

Embora se considere razoável aceitar resultados de simulação para o segundo ano de funcionamento do sistema, é importante analisar a evolução no tempo do funcionamento do mesmo, de modo a verificar a influência no seu desempenho.

Considerando a superfície adiabática, foram simulados os quatro casos de fluxo definidos na secção 4.4 e a geometria *Compact Pipes*. Analisaram-se os resultados referentes ao vigésimo ano de funcionamento comparando-os com os relativos ao segundo ano de funcionamento, já apresentados na Fig. 11. Para além do clima virtual, cujos resultados estão apresentados nos gráficos da Fig. 20, foram estudados os climas reais, que podem ser consultados nos anexos D, E e F (Fig. D1, E1 e F1, respetivamente).

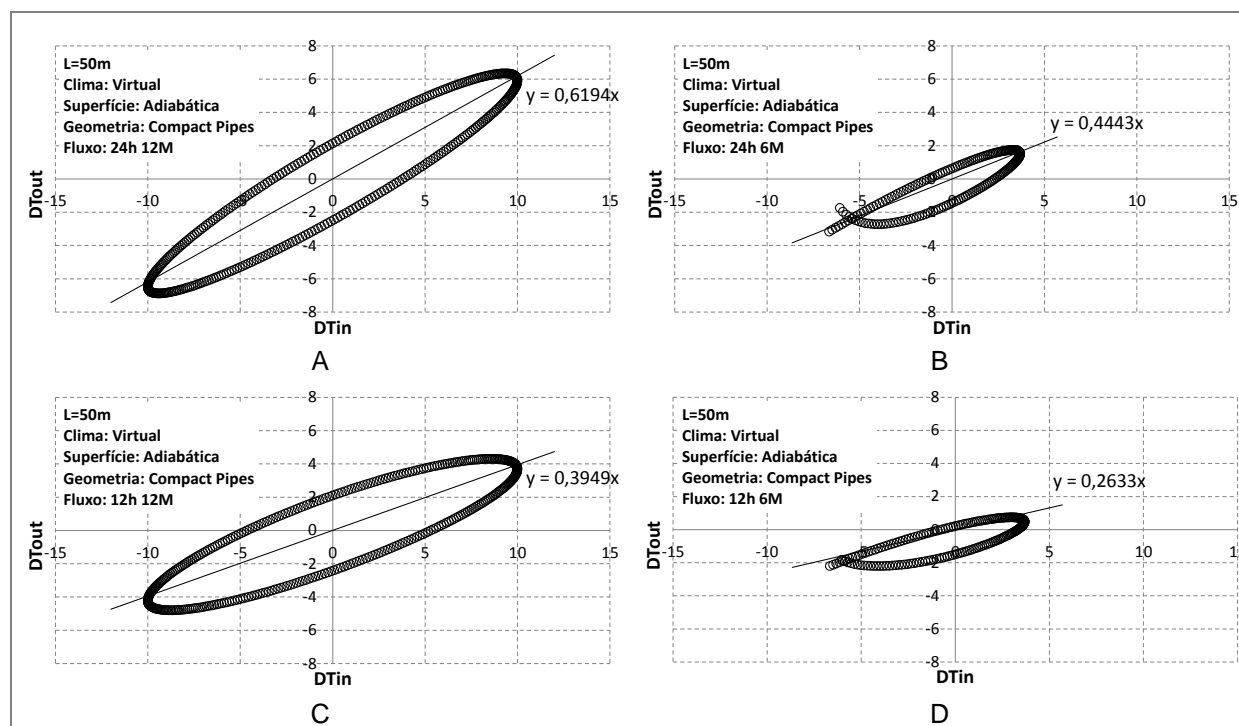


Fig. 20 – Gráficos de dispersão referentes ao clima virtual, no vigésimo ano de funcionamento, para A. 24h12M B. 24h6M C. 12h12M e D. 12h6M e superfície adiabática.

Comparando os resultados da Fig. 20 com os resultados da Fig. 11, verifica-se que para o funcionamento a fluxo constante, 24h 12M, a diferença é irrelevante. Nos restantes casos, pelo facto do sistema funcionar a temperaturas mais elevadas, a temperatura média do solo aumenta, traduzindo-se num aumento da temperatura de média do ar à saída do tubo. Desta forma, a temperatura média diária, $T_{xMed}(t)$, aproxima-se da temperatura média do ar à entrada, T_{0Med} , correspondente ao período de funcionamento fazendo diminuir DT_{out} , e consequentemente o fator de atenuação. Esta situação é mais evidente para o caso do fluxo 12h6M, uma vez que o sistema funciona não só nos 6 meses mais quentes do ano mas também nas 12h mais quentes do dia. Este caso encontra-se detalhado na Fig. 21 e na Fig. 22, cuja diferença entre o fator de atenuação anual, calculado para um tubo com 50m de comprimento, para o segundo e o vigésimo ano de funcionamento é da ordem dos 8%.

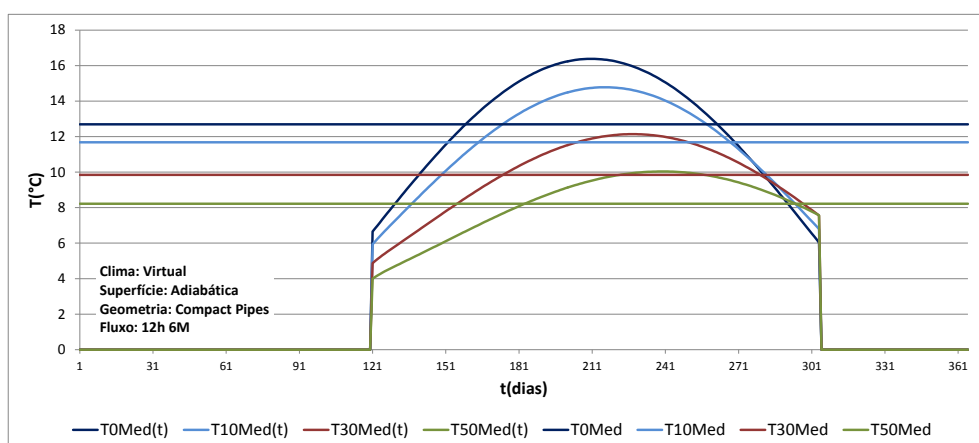


Fig. 21 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para o segundo ano de funcionamento.

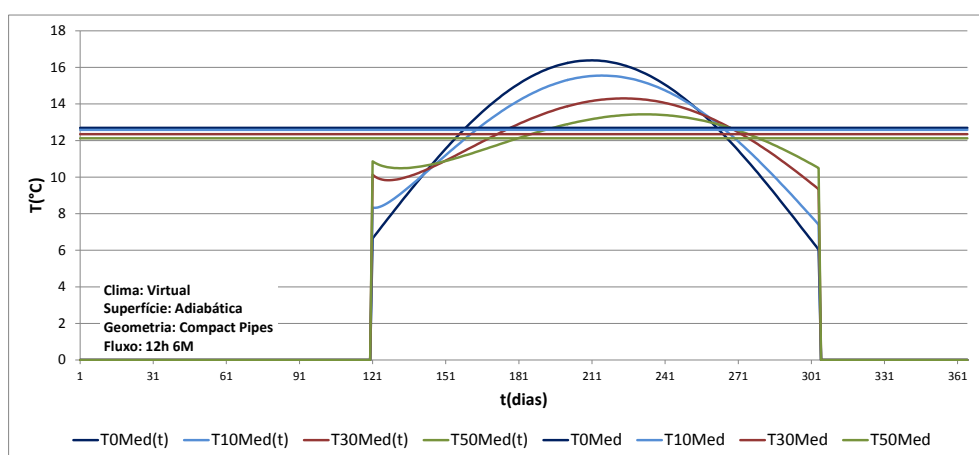


Fig. 22 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para o vigésimo ano de funcionamento.

É evidente que, apesar de o fator de atenuação ser menor ao fim de 20 anos, não revela um melhor desempenho do sistema, uma vez que as temperaturas médias do ar à saída do tubo são superiores.

A análise dos resultados obtidos para os climas reais resulta no mesmo tipo de consideração, o que reforça as conclusões obtidas com o clima virtual.

Para além da superfície adiabática, considerou-se também a superfície com convecção e absorção solar. Simulou-se, para fluxo constante e geometria *Compact Pipes*, os climas de Lisboa, Genebra e São Paulo. O clima de Lisboa está representado na Fig. 23 e os restantes nos anexos E e F, de onde se pode concluir que a diferença existente é desprezável. Este comportamento verifica-se também nos restantes climas.

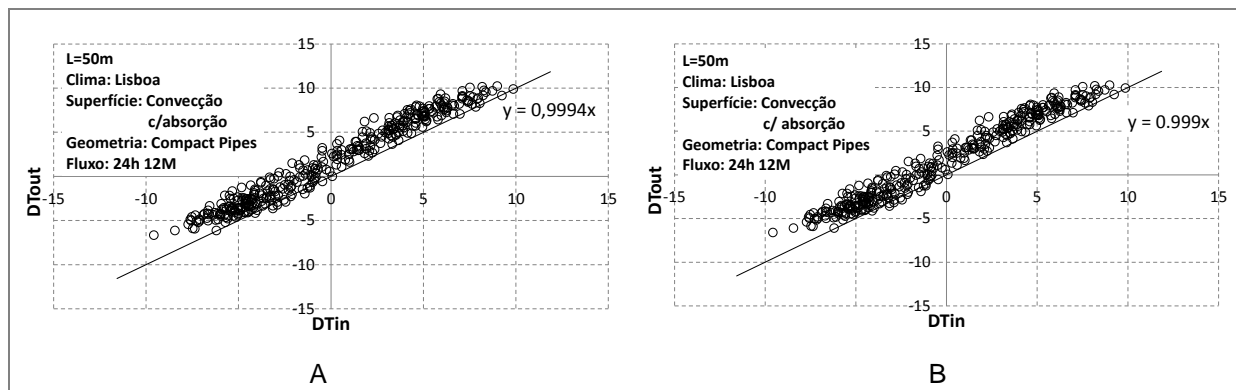


Fig. 23 - Gráficos de dispersão referentes ao clima de Lisboa, para **A.** segundo ano de funcionamento e **B.** vigésimo ano de funcionamento e superfície com convecção e absorção solar.

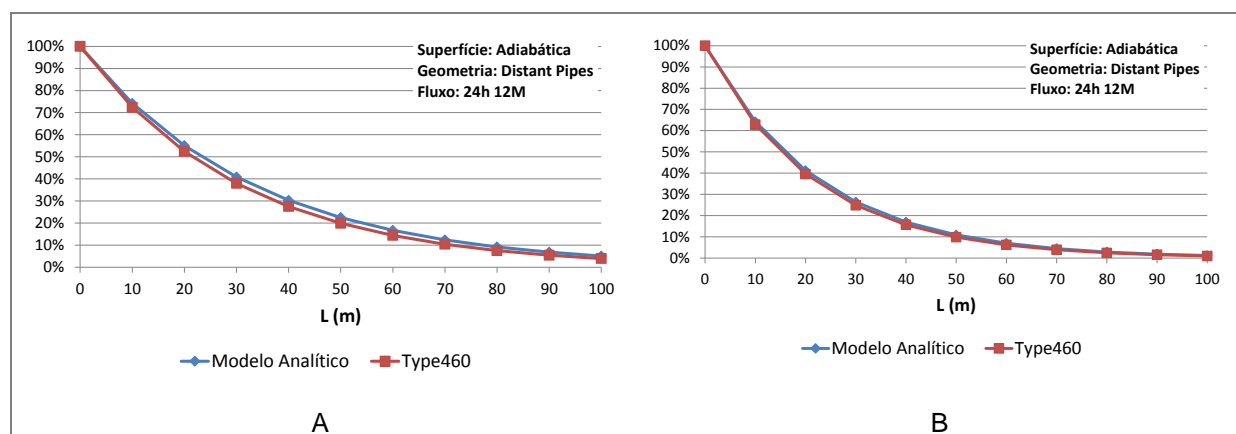
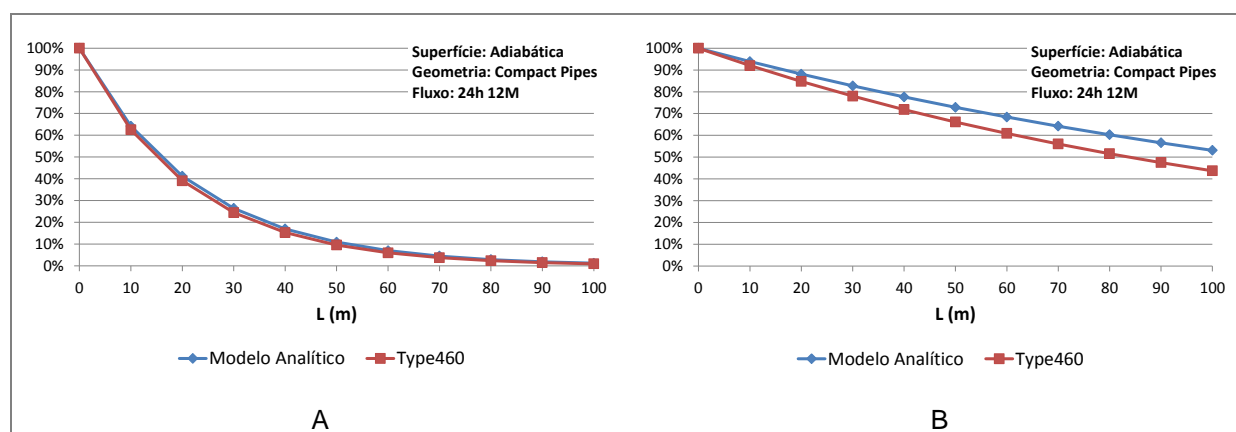
5. Modelo Analítico e de Simulação

No contexto de trabalhos de investigação decorridos anteriormente, [8], foi desenvolvido um modelo analítico que explica o funcionamento do sistema de tubos enterrados, embora com algumas aproximações.

Neste capítulo fez-se uma análise comparativa entre os resultados passíveis de se obter através do modelo analítico com os resultados do modelo de simulação, *Type460*, de modo a avaliar a sua proximidade.

Foram analisadas as duas geometrias: *Compact Pipes* e *Distant Pipes*. Considerou-se o funcionamento do sistema a fluxo constante e assumiu-se a superfície do solo em contato com o ar ambiente adiabática.

A análise dos resultados obtidos pelo modelo analítico limitou-se apenas à relação entre as amplitudes, desprezando-se o desfasamento. Assim, teve-se apenas em consideração a componente exponencial que afeta a amplitude do sinal de entrada (cf. Equação 12). No caso da análise dos resultados do modelo de simulação, aplicou-se a análise de Fourier. Os resultados obtidos estão representados nas figuras seguintes.



Analisando os resultados obtidos verifica-se que apenas a geometria *Compact Pipes* apresenta uma diferença, que aumenta com o aumento do comprimento do tubo. Em termos anuais, para um tubo de 100m, a diferença é cerca de 10%. Esta divergência é justificável pela diferença no volume de solo, disponível para armazenamento de energia, considerado em cada um dos modelos. No modelo analítico, Fig. 26A o volume considerado é menor que no modelo de simulação, Fig. 26B. Logo, ao modelo analítico associa-se um menor volume disponível para dissipação de energia, traduzindo-se num fator de atenuação superior (atenuação efetiva inferior) ao do modelo de simulação, que representa um menor poder em reduzir a amplitude de oscilação da temperatura do ar ambiente.

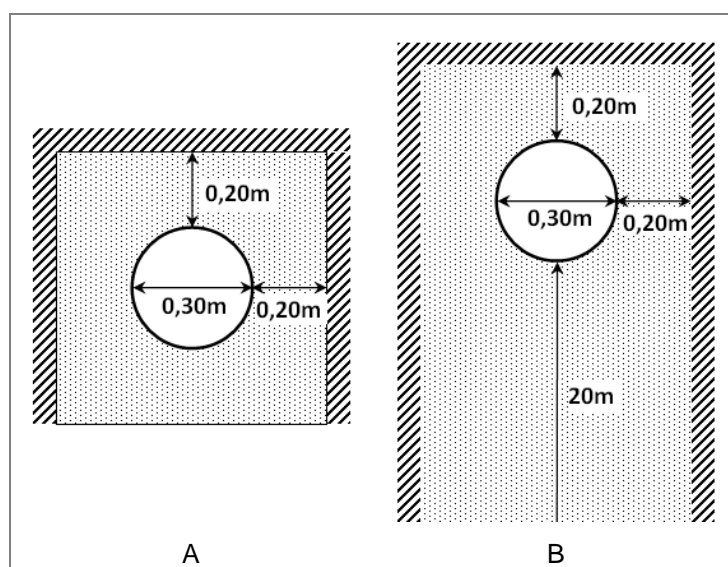


Fig. 26 - Representação esquemática do **A.** modelo analítico e **B.** do modelo de simulação *Type 460*, b).

6. Modelo de Simulação

6.1. Condições de fronteira variáveis

6.1.1. Convecção sem absorção de radiação vs Adiabática

Considerando as diferentes condições de fronteira, superfície do solo adiabática ou superfície do solo com convecção sem absorção de radiação solar, foi possível analisar o efeito das mesmas no desempenho do sistema. Além disso, verificou-se o efeito do aumento da intensidade de fluxo. Os gráficos dos fatores de atenuação resultantes estão apresentados nas figuras que se seguem.

É importante referir que, em conjunto com as figuras 12 à 17, os gráficos de extremos diários de temperatura do ar, bem como os de temperatura média diária do ar, para cada um dos climas, que estão na origem dos fatores de atenuação presentes nos gráficos que se seguem estão disponíveis em anexo. Os anexos G, H e I correspondem à geometria *Compact Pipes* enquanto os anexos J K e L são reservados à geometria *Distant Pipes*.

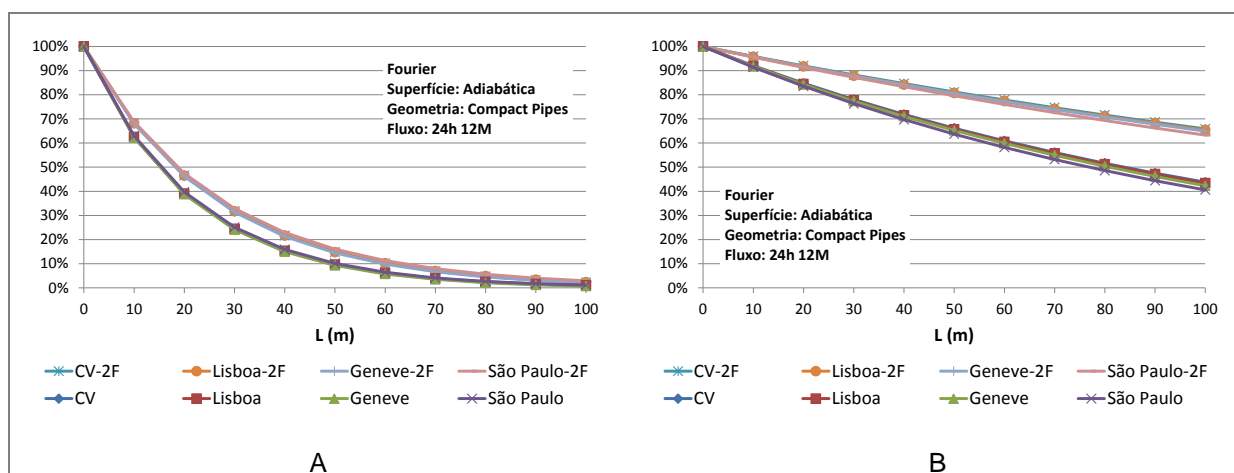


Fig. 27 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria *Compact Pipes* e superfície Adiabática, com fluxo de 200m³/h e 400m³/h.

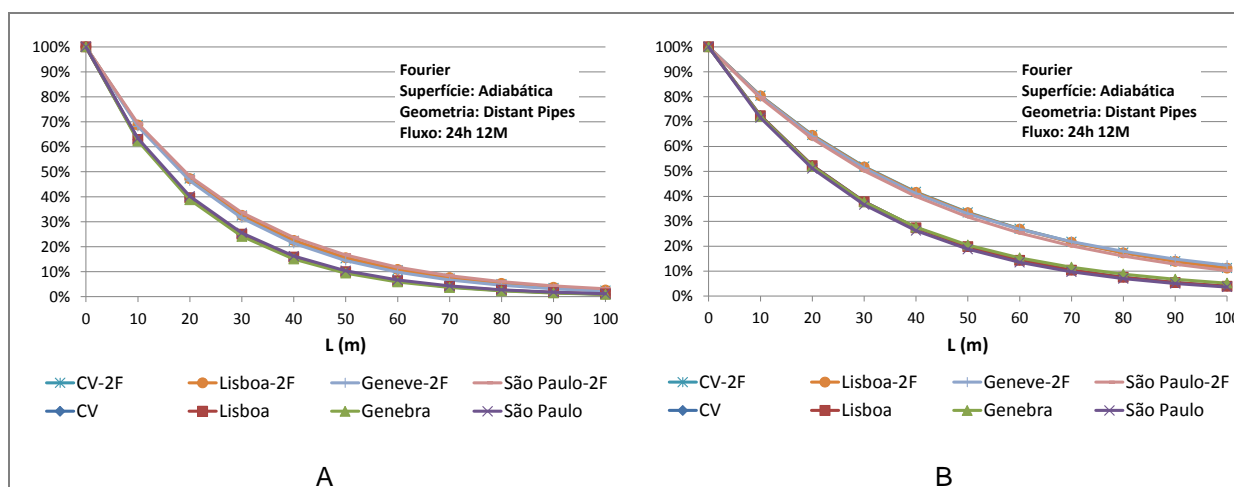


Fig. 28 - Atenuações A. diárias e B. anuais para a geometria *Distant Pipes* e superfície Adiabática, com fluxo de 200m³/h e 400m³/h.

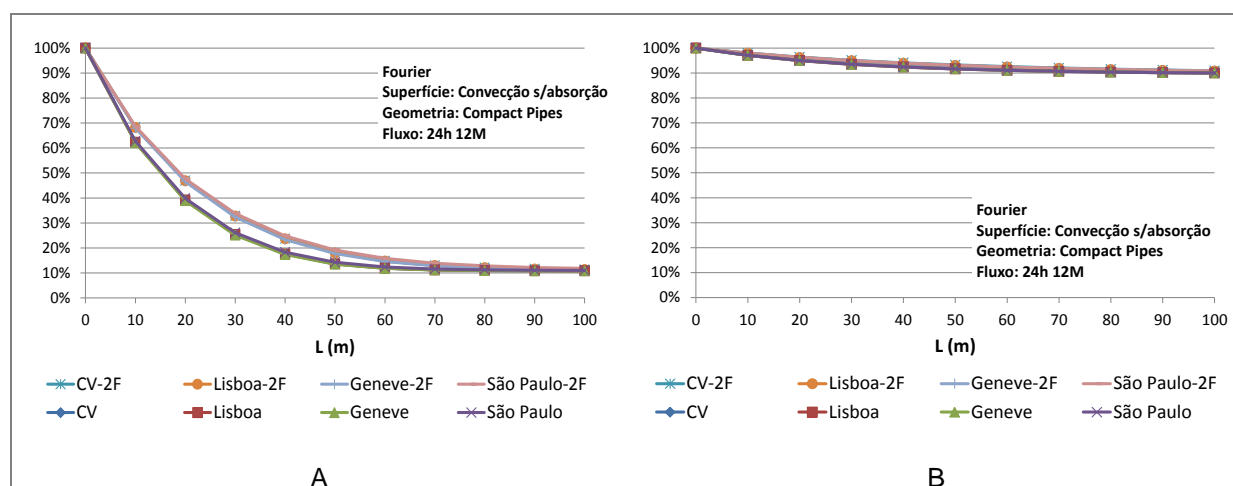


Fig. 29 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para a geometria *Compact Pipes* e superfície com convecção, com fluxo de 200m³/h e 400m³/h.

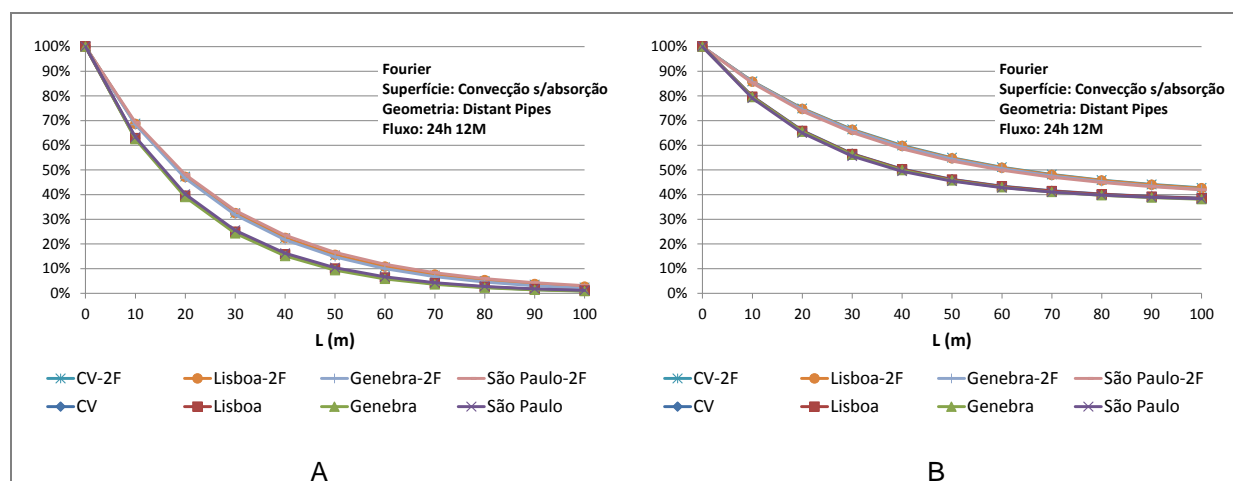


Fig. 30 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para a geometria *Distant Pipes* e superfície com convecção, com fluxo de 200m³/h e 400m³/h.

Como seria esperado, o aumento da intensidade do fluxo conduz a um aumento no fator de atenuação e consequentemente à diminuição da atenuação efetiva. Voltando à equação 9, o coeficiente de transferência de calor por convecção depende do número de Reynolds que, por sua vez, depende da velocidade do fluido. Assim, aumentando o caudal, a velocidade também aumenta, bem como o número de Reynolds, e, consequentemente, o coeficiente de transferência de calor por convecção, h_a . Mantendo constante o fluxo de calor por unidade de área, q_{conv} , com um aumento de h_a , a diferença de temperatura resultante é menor, equação 20, traduzindo-se numa menor atenuação (maior fator de atenuação).

$$q_{conv} = h_a \Delta T \quad (20)$$

Analisando os fatores de atenuação diários (Fig. 27A, Fig. 28A, Fig. 29A e Fig. 30A) e observando os gráficos das figuras 12, 14 e 16, referentes à superfície adiabática, bem como as figuras G1, H1 e I1 presentes em anexo, referentes aos casos em que se considera a superfície com convecção sem absorção solar, verifica-se que, apesar dos fatores de atenuação se sobreporem para cada tipo de superfície, não refletem a mesma gama de amplitude térmica entre extremos diários. Enquanto no clima de Lisboa verifica-se uma temperatura do ar ambiente máxima, aproximada por Fourier, de 26,8°C que resulta numa temperatura máxima do ar à saída do tubo de 20,7°C, no clima de Genebra a

temperatura máxima do ar ambiente é de 23°C que conduz a uma temperatura máxima do ar à saída do tubo de 16.4°C. Isto enfatiza a questão de que o fator de atenuação não revela uma redução efetiva, sendo relativo a uma base climática.

Relativamente à geometria *Distant Pipes*, é de referir que os fatores de atenuação obtidos estão bem refletidos nos gráficos de temperatura média e extremos diários. Para a superfície adiabática, verifica-se, em qualquer um dos climas, uma grande redução da temperatura (cf. Figuras J1, J2, K1, K2 e L1, L2 em anexo). Comparando os gráficos relativos à superfície adiabática com os relativos à superfície com convecção, é notável a redução menos acentuada da temperatura média diária, no segundo caso, devido ao fator de atenuação anual estabilizar num valor que ronda os 40% (cf. Figuras J4, K4 e L4 em anexo).

No que diz respeito à superfície adiabática, Fig. 27 e Fig. 28, é de esperar que os valores obtidos tendessem para 0 uma vez que, sem a interferência da oscilação de temperatura exterior à superfície, a dissipação da energia apenas dependeria da área de contacto, inerente ao volume de solo disponível. Verifica-se que isto não acontece apenas para a geometria compacta, caso anual, Fig. 27B, uma vez que para $L=100\text{m}$, a área de contacto não é ainda suficiente para atenuar por completo a oscilação anual, além da limitação do volume de solo disponível.

Relativamente à superfície com convecção, Fig. 29 e Fig. 30, e contrariamente ao caso da superfície adiabática, é esperado que haja um valor limite, diferente de zero, para o valor mínimo de atenuação que é possível obter. No caso da geometria compacta, as atenuações diária e anual tendem para 10%, Fig. 29A e 90%, Fig. 29B, respetivamente. De referir que o fator de atenuação anual de 90% resulta numa atenuação de temperatura quase nula (cf. Figuras G2, H2 e I2, em anexo). No caso da geometria distante, a atenuação anual tende para 40%, Fig. 30B. Contudo, a atenuação diária tende para 0 uma vez há volume suficiente de solo para combater a interferência da superfície, Fig. 30A. É interessante avaliar a veracidade deste resultado comparando com uma abordagem teórica. Esta abordagem, embora não tenha em conta a presença da tubagem, pode fornecer uma ideia do valor limite para a percentagem de oscilação a obter a determinada profundidade.

Deste modo, sabe-se que a evolução da temperatura no solo é dada por [13]:

$$\frac{T(x, t) - T_i}{\Delta T} = \exp\left[-\frac{x}{\delta}\right] \sin\left[\omega t - \frac{x}{\delta}\right] \quad (21)$$

Esta equação é válida para um regime quase estacionário onde as temperaturas flutuam periodicamente no tempo em torno de um valor médio constante. A amplitude das flutuações decai exponencialmente com a distância à superfície.

Uma análise de sensibilidade do fator exponencial, para valores de profundidade de penetração diários, δ_d , e anuais, δ_y , revela que é possível determinar a atenuação máxima que é possível obter no solo, para determinada profundidade, x .

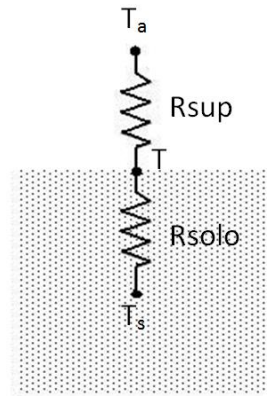


Fig. 31 – Esquema representativo das resistências térmicas em consideração.

Uma vez que se trata de um caso com resistência convectiva, há uma percentagem de energia obrigatoriamente perdida à superfície, $\%_{sup}$. Esta percentagem afeta o valor da atenuação máxima e pode ser determinada aplicando a noção de resistência térmica equivalente, esquema da Fig. 31, cujo resultado se traduz na relação seguinte.

$$\%_{sup} = \frac{T - T_s}{T_a - T_s} = \frac{R_{solo}}{R_{solo} + R_{sup}} \quad (22)$$

O gráfico da Fig. 32 é a base da análise de sensibilidade, e tem em conta a influência que a percentagem de energia perdida à superfície possui no fator exponencial.

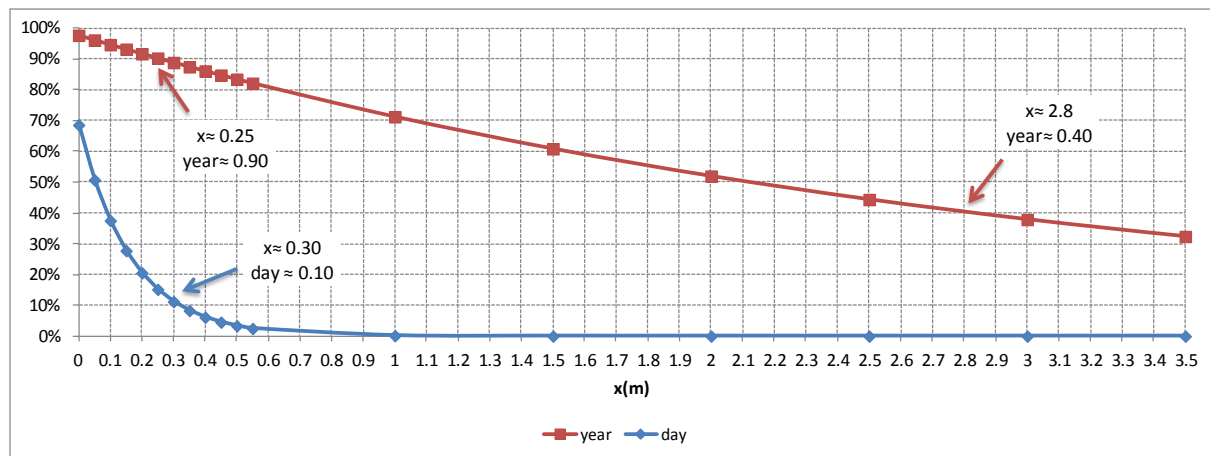


Fig. 32– Atenuação da temperatura no solo em função da distância à superfície.

Verifica-se que, no caso da geometria compacta, para que se obtenham os valores de atenuação máxima obtidos pelo método de Fourier, a profundidade deverá ser aproximadamente 0.25m para o valor anual e de 0.30m para o valor diário. No caso da geometria distante, a profundidade correspondente é de cerca de 2.8m.

Considera-se que os valores são fisicamente plausíveis uma vez que se obtêm para profundidades que correspondem a cotas próximas daquelas a que o tubo está colocado, como se pode verificar confrontando a Fig. 5, referente aos tipos de geometria.

6.1.2. Variação da temperatura com a profundidade

Aparentemente, é favorável instalar o sistema a uma profundidade cada vez maior. Porém, sabe-se que, o coeficiente de difusão térmica do solo, h_s , estabiliza a partir de determinado valor de profundidade [8]. Como tal, a partir de certa profundidade suspeita-se que não é favorável aumentar a profundidade a que os tubos devem estar enterrados. Tendo como base a geometria *Compact Pipes*, procedeu-se ao estudo da atenuação para um conjunto de valores de profundidade.

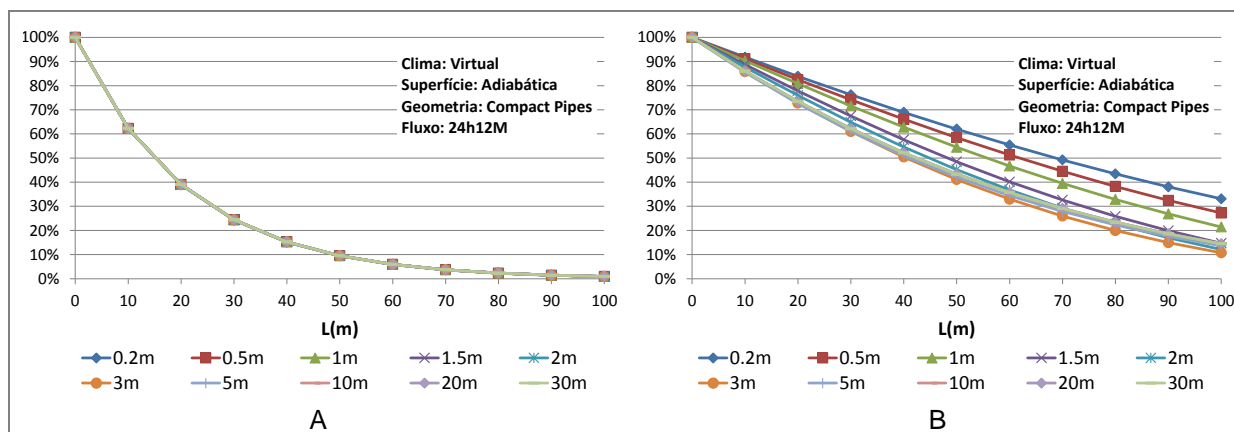


Fig. 33 - Variação do fator de atenuação **A.** diário e **B.** anual com a profundidade para a geometria *Compact Pipes* e superfície adiabática.

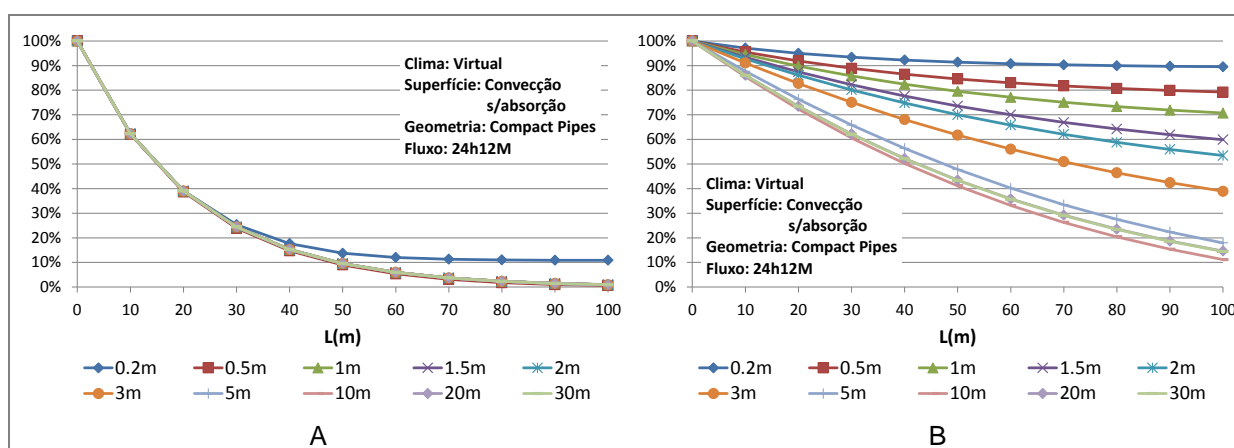


Fig. 34 – Variação do fator de atenuação **A.** diário e **B.** anual com a profundidade para a geometria *Compact Pipes* e superfície com convecção.

No caso em que se considera a superfície adiabática, Fig. 33, valores superiores à profundidade de penetração, seja diária ou anual, não melhoram o desempenho do sistema. Desta forma, para o caso diário, poder-se-á colocar um limite de aproximadamente 0.20m de profundidade e para o caso anual de 3m de profundidade.

Para o caso mais próximo da realidade, considerando convecção, Fig. 34, devido à influência da oscilação de temperatura à superfície, a profundidade limite é superior ao caso de superfície adiabática. Assim, neste caso, para atenuar a oscilação diária não é necessário exceder os 0.50m enquanto a atenuação anual não é alterada para profundidades superiores aos 10m.

6.1.3. Efeito da absorção de radiação

O efeito da absorção de radiação pela superfície do solo foi analisado apenas para o fluxo base, 200 m³/h por tubo, e está representado nos gráficos da Fig. 35 e da Fig. 36. De referir que a representação do clima virtual serve apenas de base para a comparação uma vez que não tem em conta a presença de radiação solar.

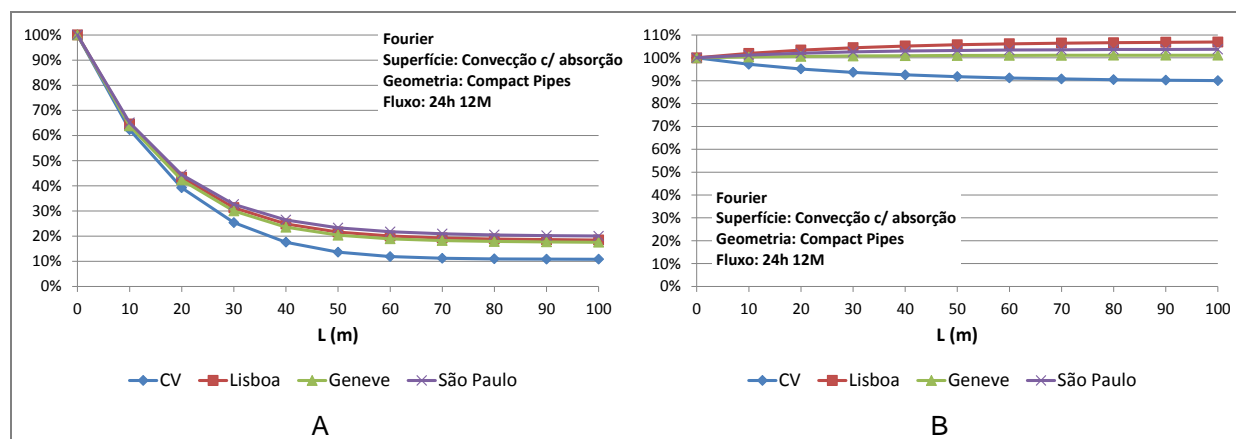


Fig. 35 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para a geometria *Compact Pipes* e superfície com convecção e absorção solar.

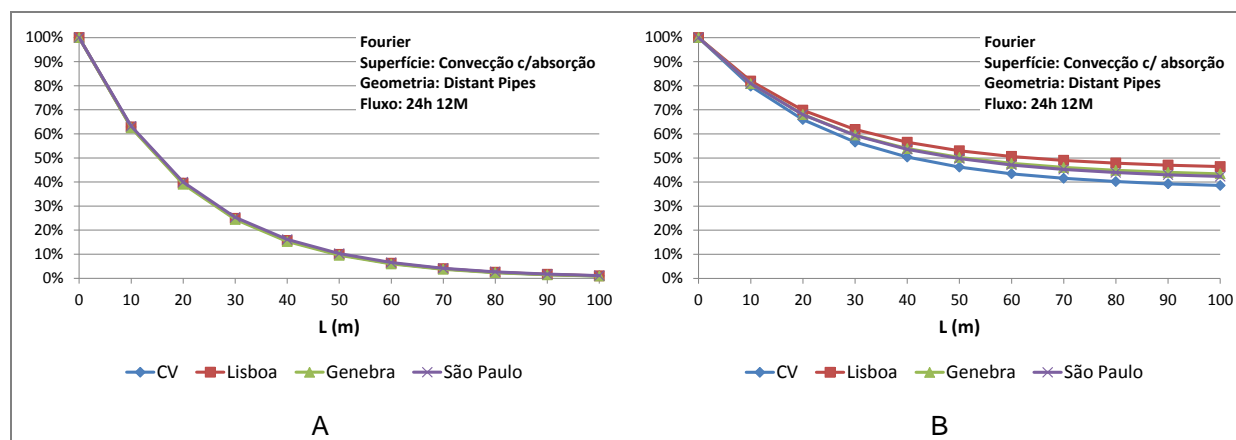


Fig. 36 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para a geometria *Distant Pipes* e superfície com convecção e absorção solar.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a introdução da radiação solar, uma fonte de calor, altera, de forma evidente e até importante, o comportamento do sistema.

De uma forma geral, a absorção de radiação leva a um aumento do fator de atenuação, ou seja, a oscilação efetiva sofre uma menor atenuação. No caso específico da geometria compacta, o fator de atenuação anual é superior ou igual a 100% para qualquer um dos climas. Isto demonstra que a radiação solar, ao aquecer o solo, aumenta a temperatura deste, por vezes, para valores superiores à temperatura do ar ambiente. Assim, a temperatura média de ar à saída do tubo pode ser superior à temperatura ambiente. Esta situação é bastante clara nos gráficos de temperatura média diária, apresentados nas figuras: Fig. 37, Fig. 38 e Fig. 39.

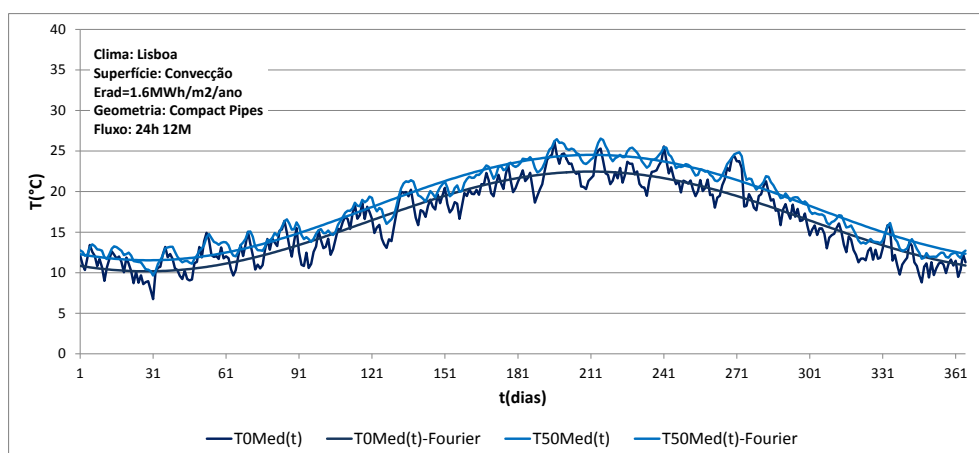


Fig. 37 - Temperatura média diária e análise de Fourier para superfície com convecção e absorção solar, para o clima de Lisboa.

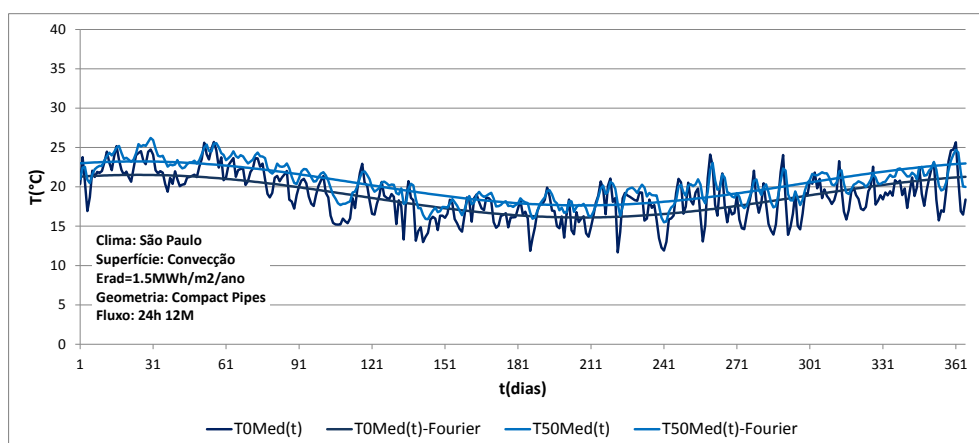


Fig. 38 - Temperatura média diária e análise de Fourier para superfície com convecção e absorção solar, para o clima de São Paulo.

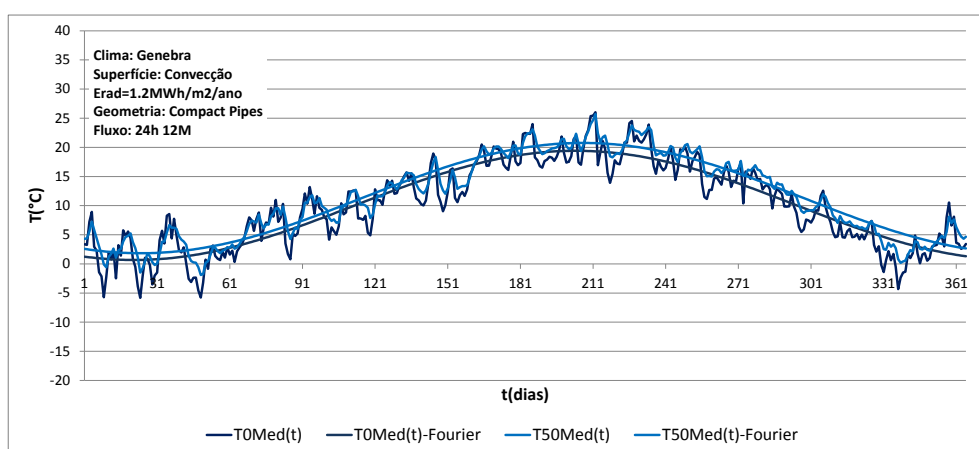


Fig. 39 - Temperatura média diária e análise de Fourier para superfície com convecção e absorção solar, para o clima de Genebra.

Entre o fator de atenuação anual e a radiação solar é também possível estabelecer uma relação. Para climas onde a radiação solar é superior, o fator de atenuação é superior e portanto a atenuação é ainda menos favorável. Considerando os casos em estudo, o clima de Lisboa, que recebe maior radiação que os restantes, $1.6\text{MWh/m}^2/\text{ano}$, origina um fator de atenuação superior aos restantes climas e como tal menos favorável ao bom funcionamento do sistema.

Para a geometria *Distant Pipes*, o efeito da radiação revela-se pouco significativo, como se pode verificar pela Fig. 36B e pelos gráficos de extremos e temperatura média diária correspondentes representados nos anexos J, K e L (figuras J5, J6; L5, L6 e K5, K6).

6.2. Caudal variável

O efeito do caudal variável no funcionamento do sistema foi analisado para os quatro modos de funcionamento definidos na secção 4.4. Foram simuladas as duas geometrias definidas, bem como cada um dos climas, mantendo-se o tipo de superfície constante: superfície adiabática.

De referir que foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados na análise de resultados, o que induz algumas diferenças relativamente aos resultados já obtidos e discutidos.

Os gráficos de extremos diários e temperaturas médias diárias, que não estão representados neste capítulo mas que estão na origem dos gráficos de atenuação nele contidos, encontram-se nos anexos M a T.

6.2.1. Compact Pipes

Nas figuras que se seguem estão representados os resultados do fator de atenuação, considerando diferentes regimes de utilização, referentes à geometria *Compact Pipes*, superfície adiabática e climas virtual e reais (Lisboa, Genebra e São Paulo).

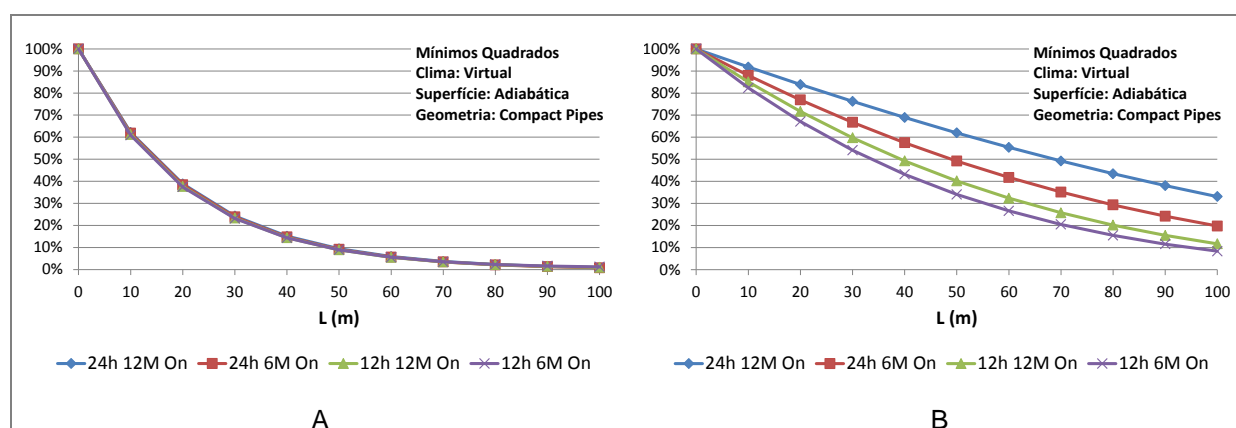


Fig. 40 – Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para o clima Virtual, geometria *Compact Pipes* e superfície adiabática.

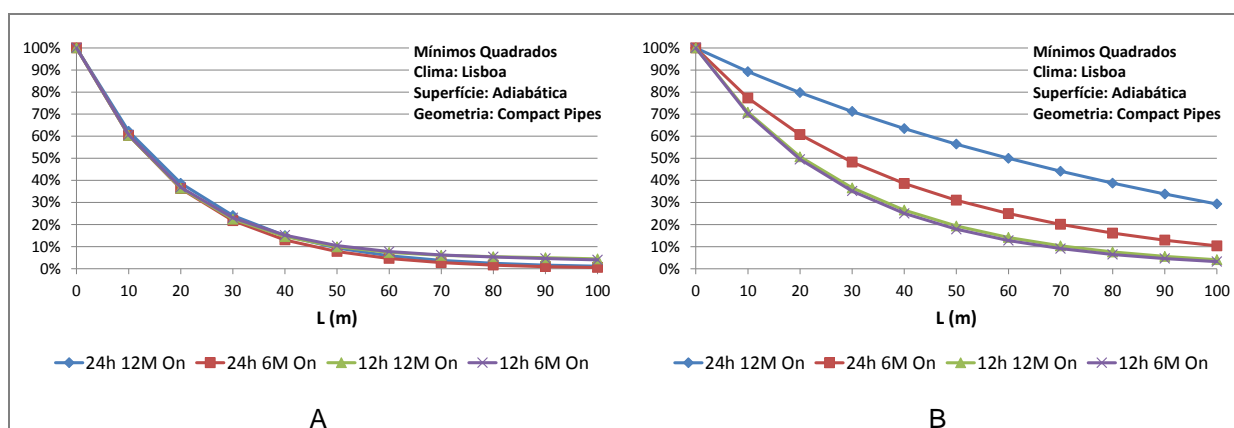


Fig. 41 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para o clima de Lisboa, geometria *Compact Pipes* e superfície adiabática.

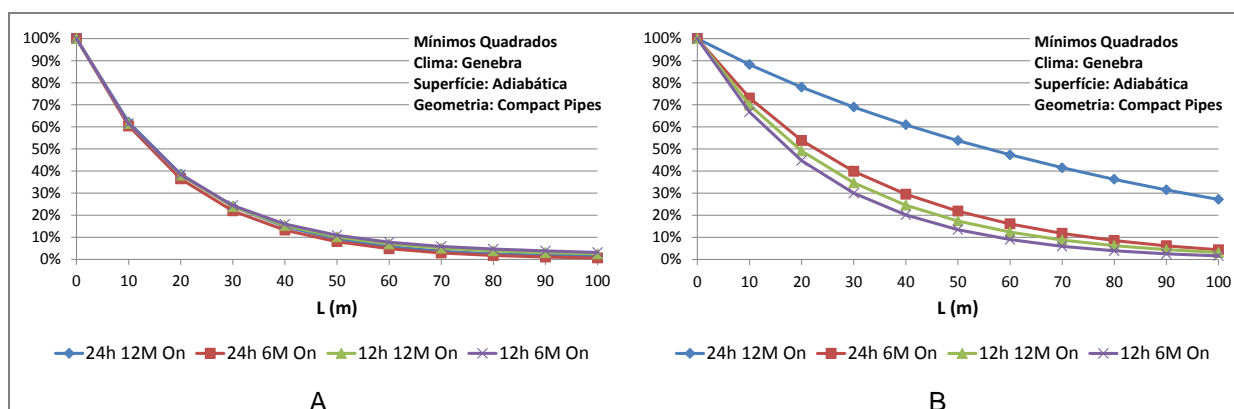


Fig. 42 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para o clima de Genebra, geometria *Compact Pipes* e superfície adiabática.

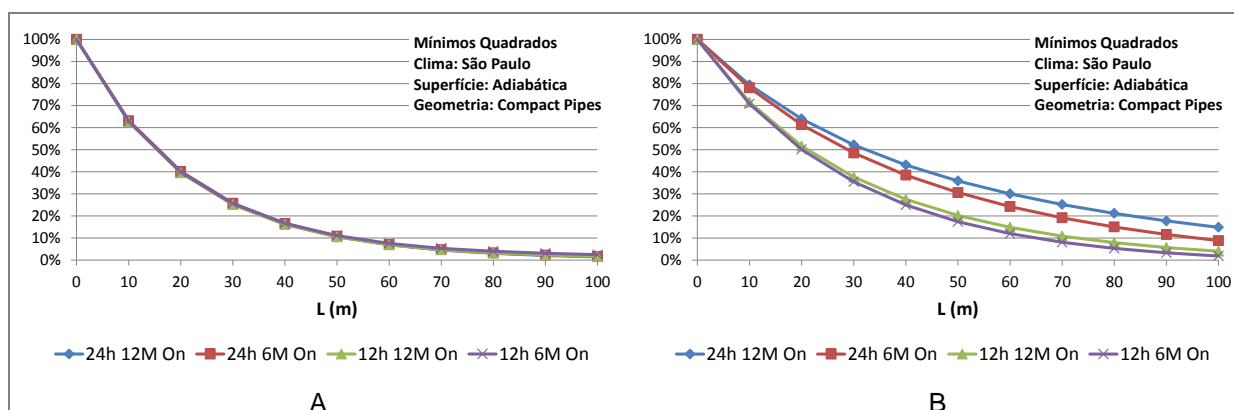


Fig. 43 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para o clima de São Paulo, geometria *Compact Pipes* e superfície adiabática.

Na mesma tendência do que se tem verificado, a atenuação diária revela-se independente da variação do fluxo. Por outro lado, entre climas, verificam-se algumas diferenças, a rondar os 2%, as quais podem se considerar desprezáveis. Assim, em termos diários, a resposta do sistema, além de independente do fluxo, não depende também das condições climáticas.

Relativamente ao fator de atenuação anual, verifica-se que, de uma forma geral, este diminui com a redução do período de atividade, o que parece contraditório pela análise os gráficos que se seguem, relativos aos perfis de temperatura média diária.

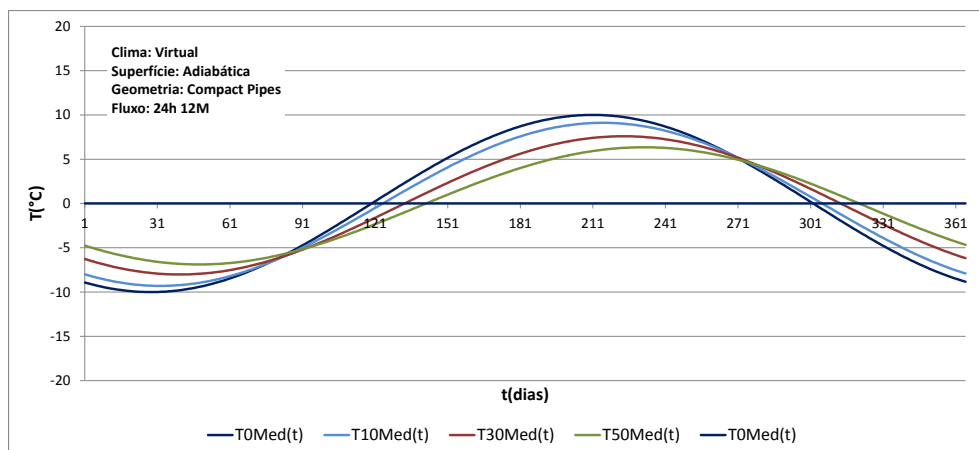


Fig. 44 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento a fluxo 24h12M.

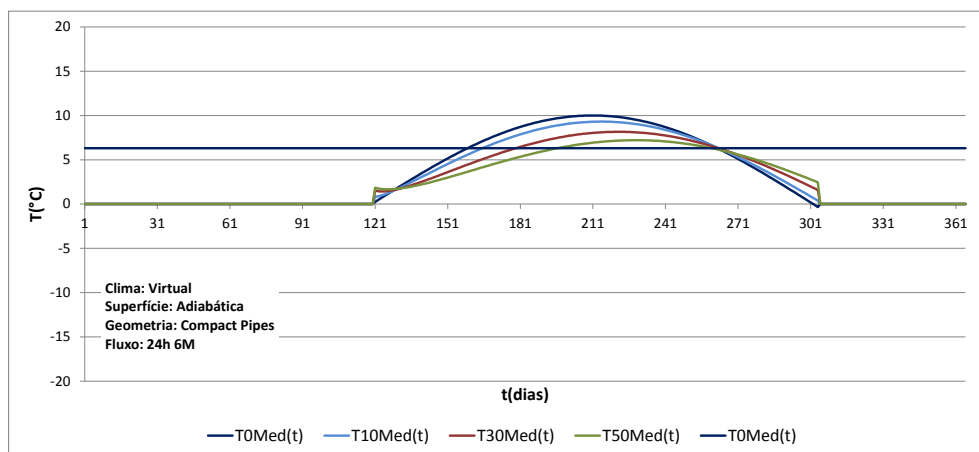


Fig. 45 - Temperatura média diária e temperatura média ambiente do período de funcionamento a fluxo 24h6M.

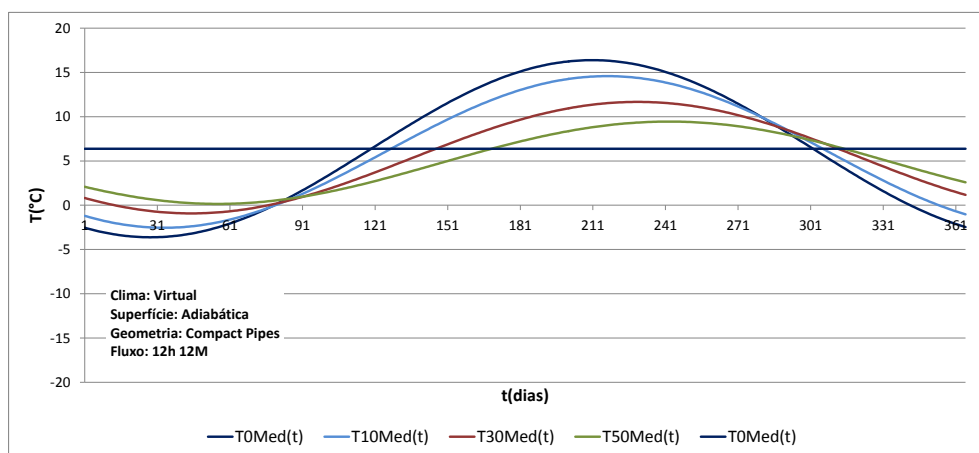


Fig. 46 - Temperatura média diária e temperatura média ambiente do período de funcionamento a fluxo 12h12M.

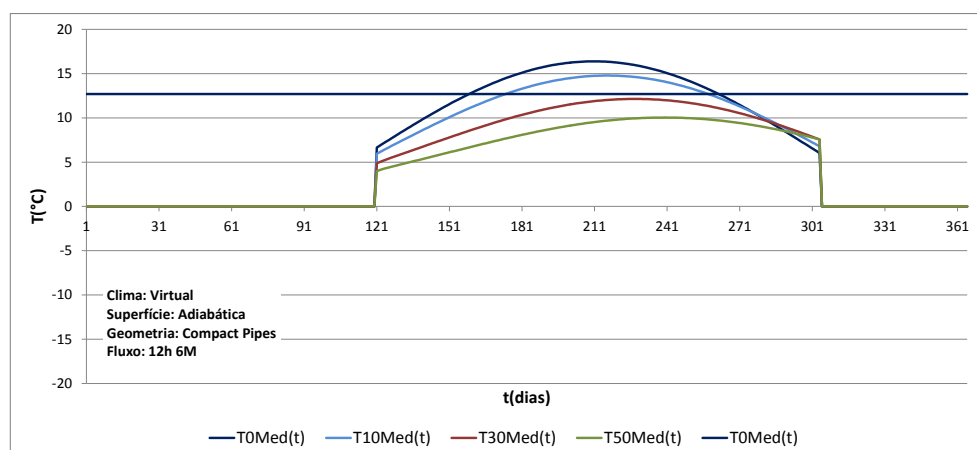


Fig. 47 - Temperatura média diária e temperatura média ambiente do período de funcionamento a fluxo 12h6M.

Confrontando as figuras precedentes, observa-se que a temperatura média máxima do ar à saída é sucessivamente superior, quanto menor o número de horas de funcionamento. Assim sendo, a redução da oscilação é menor, o que, à partida, se deveria traduzir, em fatores de atenuação superiores relativamente aos obtidos para o fluxo constante, 24h12M. A explicação para tal, reside no facto do funcionamento descontínuo ocorrer em períodos em que a temperatura do ar à entrada é mais elevada. Em contato com ar a temperaturas mais elevadas, a temperatura média do solo aumenta, resultando numa temperatura média do ar à saída que é mais elevada, quanto menor for o período de funcionamento. Deste modo, a temperatura média do ar à saída aproxima-se da temperatura média do ar à entrada, conduzindo a um fator de atenuação menor, relativamente ao regime de fluxo constante, embora a atenuação efetiva seja menor. Desta forma, os fatores de atenuação para fluxos variáveis não podem ser comparados diretamente com os relativos ao fluxo constante, uma vez que a temperatura base, temperatura média de entrada do período de funcionamento, depende da situação em análise.

De referir que os resultados apresentados correspondem aos do clima virtual, uma vez que constituem exemplos representativos dos outros climas. Os gráficos relativos aos climas típicos estão disponíveis nos anexos N, O e P, respetivamente, para o clima de Lisboa, Genebra e São Paulo.

6.2.2. Distant Pipes

Os gráficos obtidos para o fator de atenuação, considerando diferentes regimes de utilização, relativos à geometria *Distant Pipes*, superfície adiabática e climas virtual e reais (Lisboa, Genebra e São Paulo), estão apresentados nas figuras que se seguem.

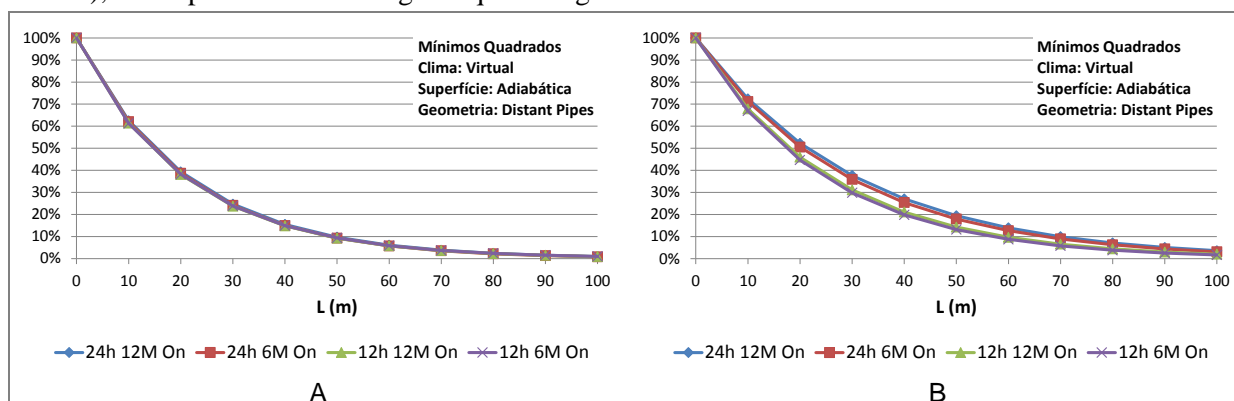


Fig. 48 - Atenuações A. diárias e B. anuais para o clima Virtual, geometria *Distant Pipes* e superfície adiabática.

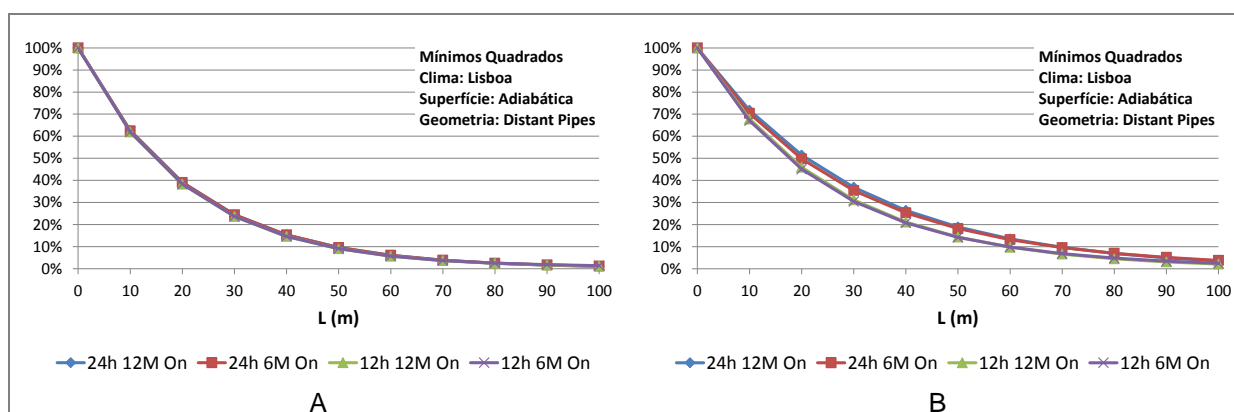


Fig. 49 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para o clima de Lisboa, geometria *Distant Pipes* e superfície adiabática.

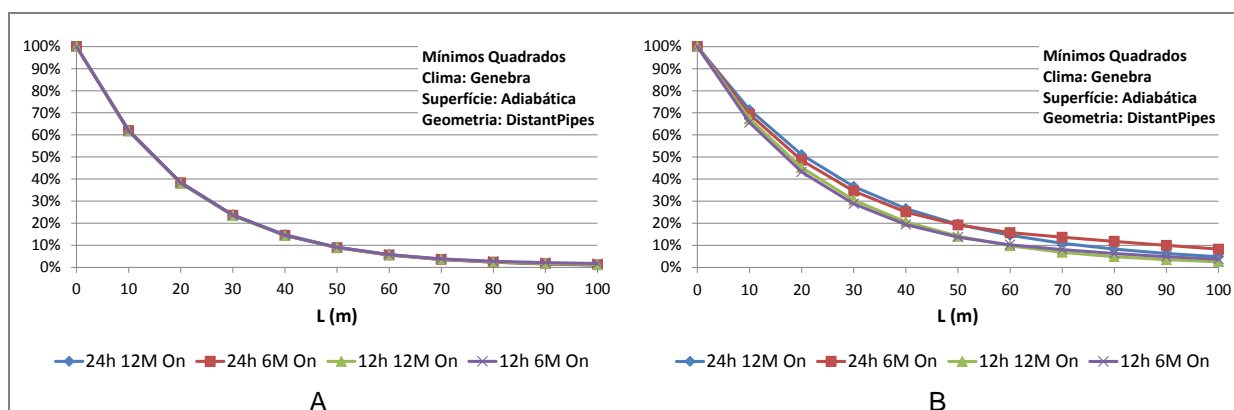


Fig. 50 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para o clima de Genebra, geometria *Distant Pipes* e superfície adiabática.

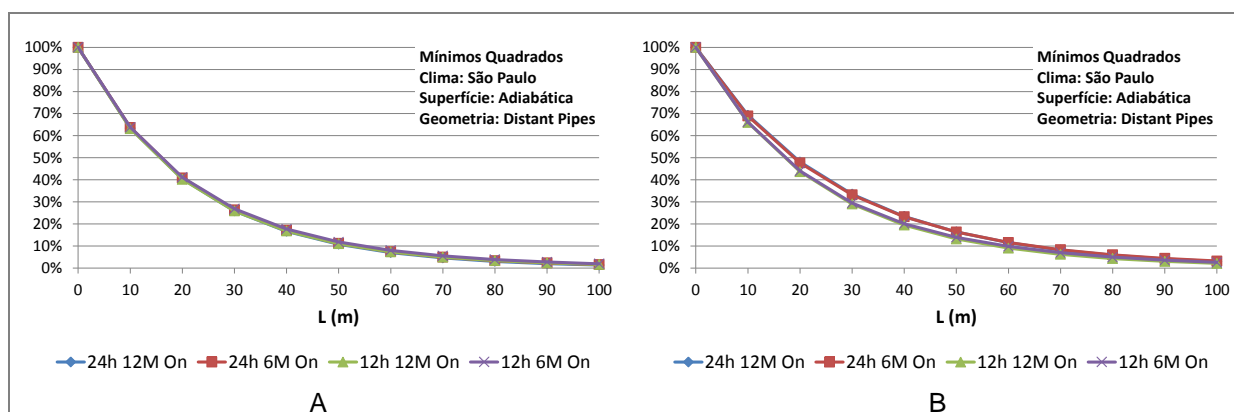


Fig. 51 - Atenuações **A.** diárias e **B.** anuais para o clima de São Paulo, geometria *Distant Pipes* e superfície adiabática.

Analisando os gráficos obtidos, verifica-se que os fatores de atenuação, diários e anuais, são semelhantes para qualquer um dos modos de funcionamento. Comparando os gráficos da Fig. 40 à Fig. 43 com os gráficos da Fig. 48 à Fig. 51, constata-se que os fatores de atenuação diários para as duas geometrias são idênticos. Pode-se assim verificar um aumento do volume de solo, superior a um determinado valor, dado por 0,20m em redor do tubo [8], não influencia a atenuação diária. Relativamente à atenuação anual, os resultados obtidos para a geometria *Distant Pipes* são consideravelmente menores, o que se explica pela maior disponibilidade de solo.

7. Caso de estudo: Edifício Solar XXI

O Edifício Solar XXI, pertencente ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia, LNEG, está localizado no campus do Lumiar, em Lisboa. Foi construído com o objetivo de minimizar o consumo de energia, integrando tecnologias renováveis e sistemas passivos para aquecimento e arrefecimento do ar. Com vista a ser um exemplo para projetos futuros, aplicaram-se diferentes estratégias como otimização térmica da envolvente, aproveitamento dos ganhos solares, utilização de dispositivos de sombreamento, fachada fotovoltaica para produção de energia elétrica e aquecimento ambiente através da recuperação de calor, coletores solares térmicos e sistema de arrefecimento passivo por tubos enterrados [14]. É nesta última estratégia que se centra o estudo desenvolvido neste trabalho.

7.1. Caracterização do sistema

O sistema de tubos enterrados deste edifício é constituído por 32 tubos com diâmetro de 30cm e que estão enterrados a 4,6m de profundidade. O ar é insuflado no edifício por convecção natural ou forçada por intermédio de pequenos ventiladores, com potência de 30W. Os tubos são feitos em betão, material com elevada condutividade térmica, que potencia as trocas de calor. O poço de alimentação, situado a 15m de distância do edifício, é responsável pela entrada de ar no sistema. Cada sala está equipada com 2 tubos que podem ser utilizados separadamente e cujo funcionamento é da responsabilidade do utilizador. Desta forma, o bom desempenho deste sistema depende fortemente da conduta humana.

Devido à colocação dos ventiladores dentro das salas, este sistema tem a desvantagem de provocar um nível de ruído considerável.

7.2. Metodologia

O estudo do sistema de tubos enterrados tem como principal intuito a comparação de resultados reais com resultados adquiridos por simulação numérica, *Type460*, correspondentes à simulação de um sistema representado fisicamente pelas características do sistema real.

Analisaram-se dados relativos a dois modos distintos de funcionamento do sistema: regime parcial e total.

O regime parcial compreende o funcionamento de apenas dois tubos, relativos a uma sala. Foram fornecidos dados, pela Unidade de Eficiência Energética, LNEG, recolhidos no âmbito de uma campanha de medições efetuada durante o mês de agosto de 2011, que resultaram do funcionamento de sistema em fluxo contínuo durante todo o mês. Os tubos em funcionamento estão assinalados, a vermelho, na Fig. 52. Para as simulações numéricas utilizaram-se dados meteorológicos, temperatura exterior e radiação solar, relativos ao ano de 2011, fornecidos pelo Laboratório de Energia Solar, LNEG.

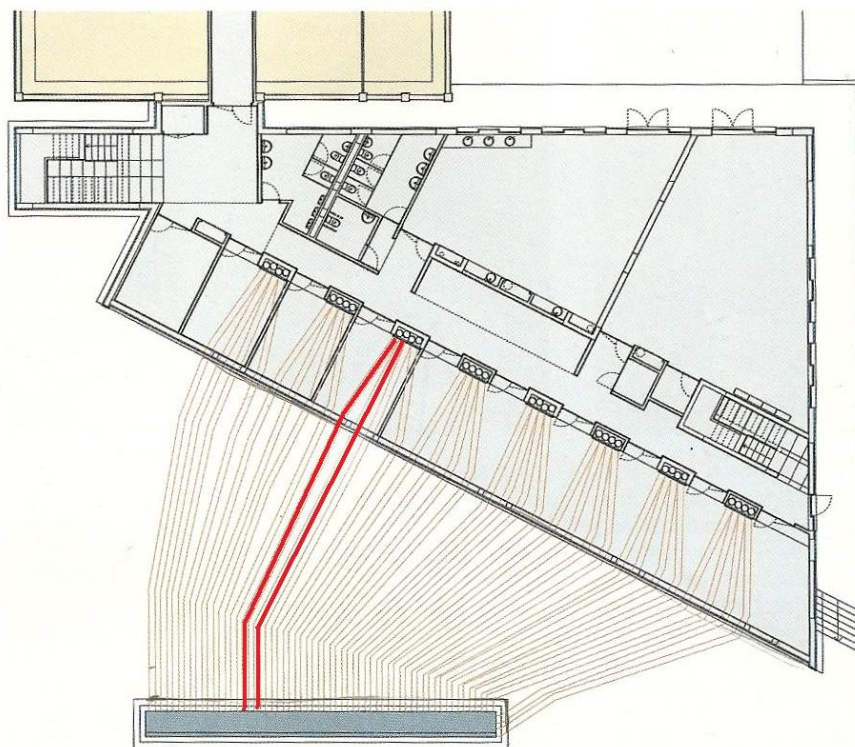


Fig. 52 – Traçado da tubagem entre o poço de admissão de ar e o edifício. Identificação dos tubos em funcionamento parcial (a vermelho). Fonte: [14].

No que diz respeito ao regime total, este corresponde ao funcionamento de todos os tubos do sistema e, como tal, compreende a climatização de todas as salas do edifício. Os dados do sistema foram adquiridos mediante a sua colocação em pleno funcionamento, a fluxo contínuo, durante um fim de semana com temperaturas relativamente elevadas ($T_{med} \approx 26^{\circ}\text{C}$), no final do mês de junho de 2013. Nas simulações numéricas, relativamente aos dados meteorológicos, foi utilizado o clima típico de Lisboa interpolado com os dados de temperatura exterior efetiva fornecidos.

Das informações fornecidas, os dados que são úteis para o trabalho são os relativos à temperatura do ar exterior, radiação solar, temperatura do ar à entrada e à saída do tubo.

De referir que todos os equipamentos necessários às medições de dados no sistema estão instalados permanentemente, pelo que não foi necessário proceder à instalação dos mesmos.

7.3. Resultados

Numa primeira análise dos dados relativos ao funcionamento em regime parcial, Fig. 53, verifica-se que a atenuação é bastante fraca ao longo do tubo ($T_{in.real}$ vs $T_{out.real}$). No entanto, é de notar que a diferença entre a temperatura do ar exterior e a temperatura do ar no início do tubo é considerável, verificando-se uma elevada atenuação entre $T_{in.real}$ e T_{ext} .

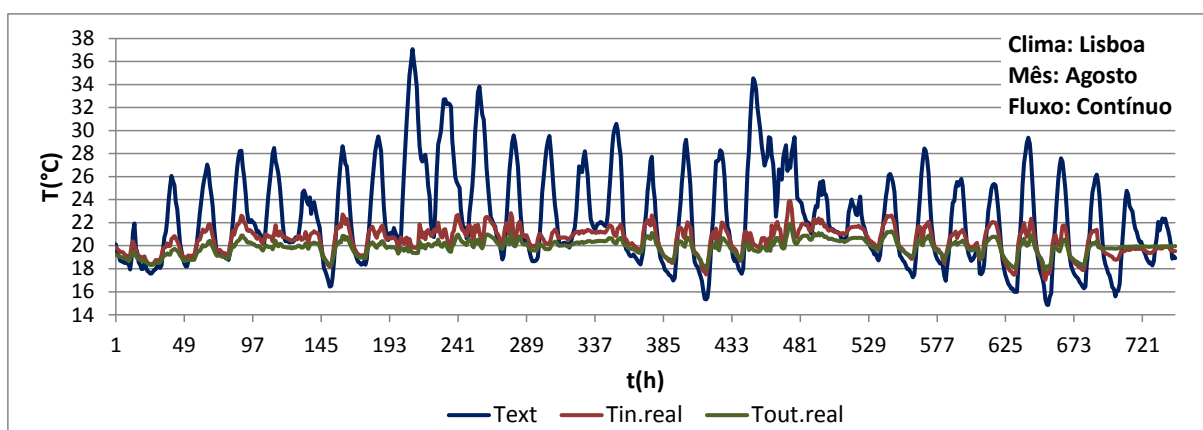


Fig. 53 – Dados do sistema instalado no Edifício Solar XXI relativos ao funcionamento em regime parcial.

Assim, simulou-se um sistema idêntico ao real de modo a que a temperatura de saída do tubo, Tout, fosse obtida a partir da temperatura exterior, Text, considerando que o tubo tem um comprimento de 15m (distância entre o edifício e o poço de alimentação). Os resultados obtidos estão presentes na figura seguinte.

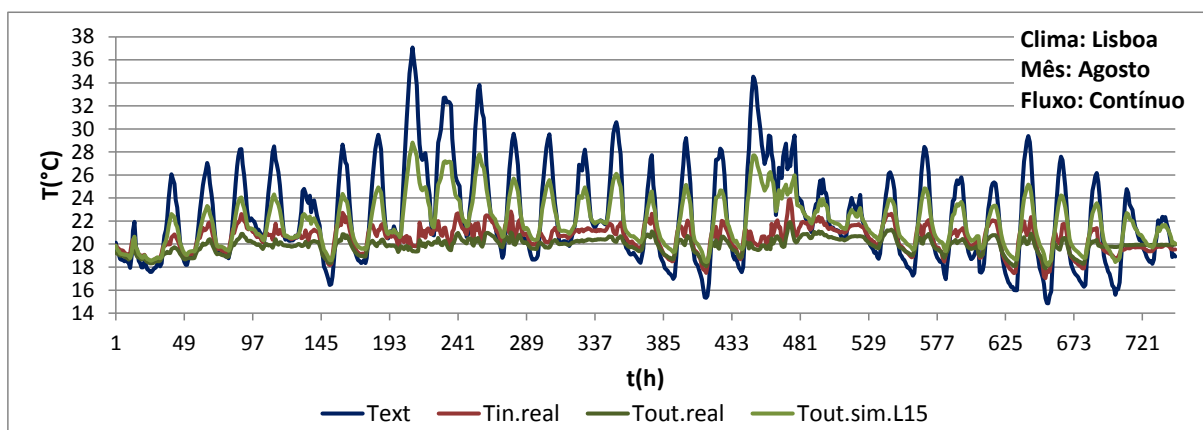


Fig. 54 – Simulação da temperatura do ar à saída, Tout.sim, com base na temperatura do ar exterior, Text, considerando $L=15\text{m}$.

Constata-se que os resultados da simulação afastam-se dos resultados reais na medida em que, para se obter a atenuação real, Tout.real, seria expectável uma maior área de contacto e, portanto, um maior comprimento de tubo.

Na tentativa de avaliar a causa do arrefecimento do ar, simularam-se diversos comprimentos de tubo de modo a aproximar a temperatura do ar à saída obtida por simulação à real, sendo possível ter uma ideia do comprimento equivalente de tubo responsável pelo arrefecimento. Os resultados constam na Fig. 55.

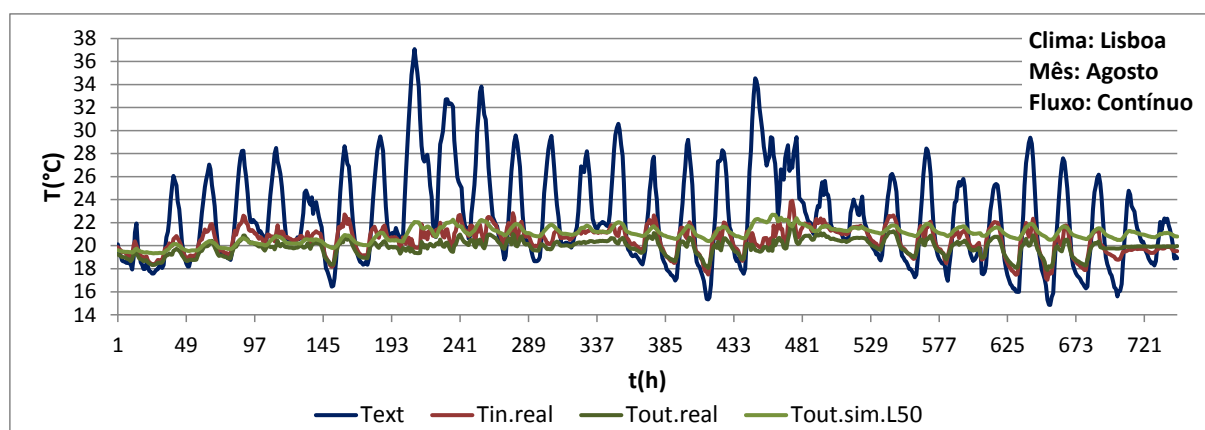


Fig. 55 - Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura exterior, Text, considerando L=50m.

Desta análise verifica-se que, as menores diferenças têm origem num tubo equivalente com aproximadamente 50m de comprimento.

Centrando a análise no que ocorre ao longo do tubo, simulou-se o comportamento do sistema tendo por base a temperatura do ar à entrada do tubo a fim de obter a temperatura do ar à saída.

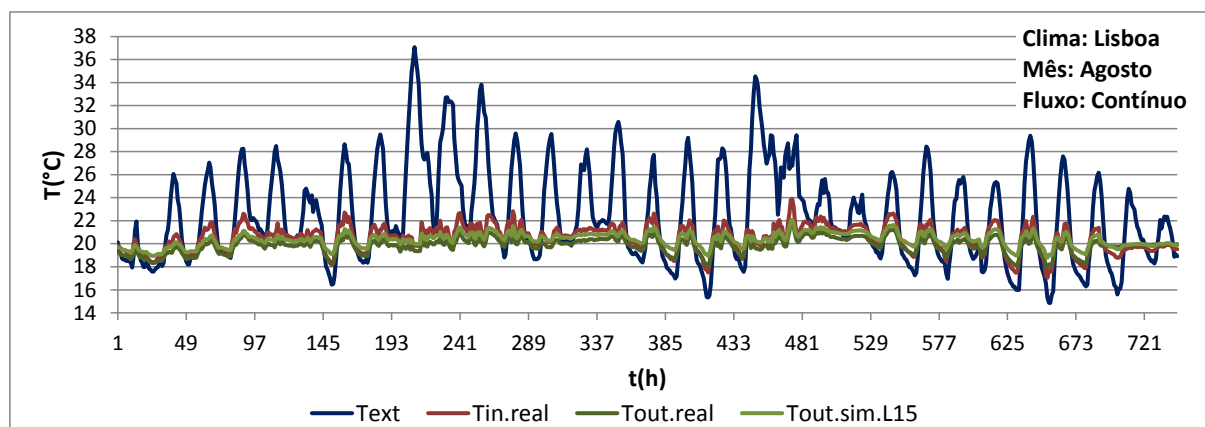


Fig. 56 - Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura de entrada, Tin.real, considerando L=15m.

Os resultados obtidos encontram-se próximos dos resultados reais, confirmando a veracidade do modelo numérico. Além disso, comprova-se que a maior atenuação ocorre efetivamente no poço de alimentação de ar. Como tal, foi analisada a ordem de grandeza do referido arrefecimento.

Numa primeira abordagem, aproximou-se o poço de alimentação a um tubo, mantendo a área de contato. Desta forma, o poço de alimentação de ar, com área de contato de aproximadamente 180m^2 , corresponde a um tubo cilíndrico equivalente com 11,3m de diâmetro. Simulou-se a nova configuração de modo a que, com base na temperatura exterior, se obtivesse a temperatura do ar à saída do tubo, que corresponde à temperatura do ar à entrada do tubo que existe na realidade. Os resultados da simulação encontram-se na Fig. 57.

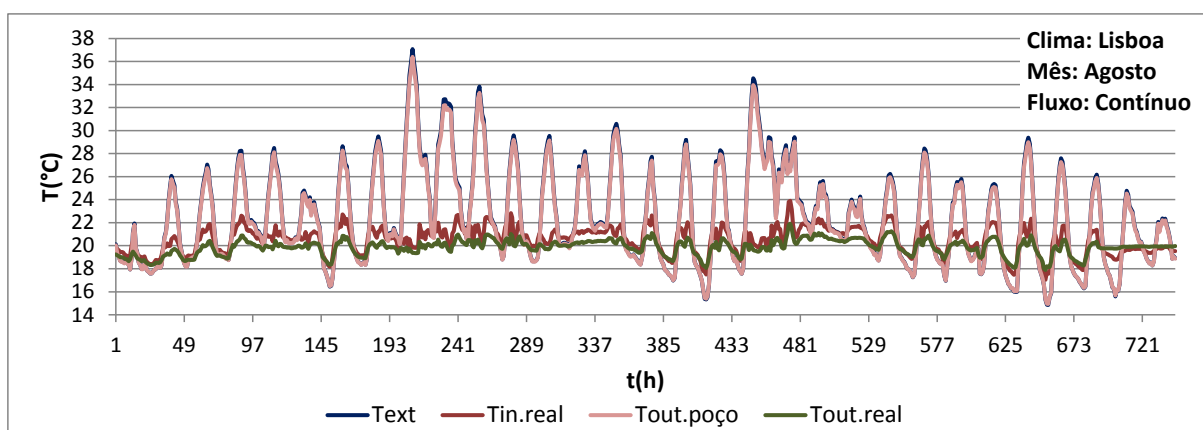


Fig. 57 - Simulação da temperatura de entrada, Tout.poço, com base na temperatura exterior, Text, aproximando o poço de alimentação a um tubo.

Apesar de esta abordagem ser lógica, verifica-se, pela Fig. 57, que está longe de ser realista, explicando-se pelo facto da entrada de ar no poço não ter uma distribuição uniforme. Nas zonas próximas dos tubos em funcionamento, a velocidade do ar é superior fazendo com que o coeficiente de convecção não seja igual em toda a área de contacto. Assim sendo, não é razoável aproximar o poço de alimentação de ar a um tubo.

Numa segunda abordagem, e tendo em conta o comprimento equivalente obtido, $L=50\text{m}$, considerou-se que o poço de alimentação corresponderia a um tubo com comprimento de 35m . Os resultados obtidos estão apresentados na figura que se segue.

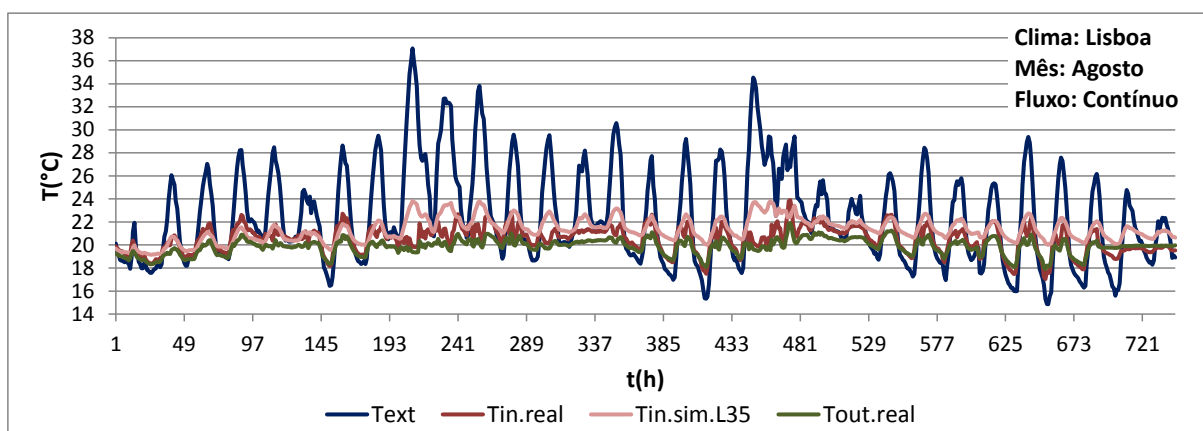


Fig. 58 - Simulação da temperatura de entrada, Tin.sim, com base na temperatura exterior, Text, considerando $L=35\text{m}$.

Como se pode ver na Fig. 58, a simulação aproxima-se da realidade, confirmando que o poder de arrefecimento no poço de alimentação equivale a um tubo enterrado com 35m de comprimento.

Uma vez que existe um grande volume de ar dentro do poço, com uma temperatura inferior à temperatura do ar ambiente, e que não é utilizado uniformemente em regime parcial, suspeita-se que a grande atenuação verificada ocorre somente porque o sistema não está a funcionar na totalidade. Por isso, foi analisado o funcionamento em regime total.

Repetiu-se a metodologia, simulando-se a temperatura do ar à saída do sistema partindo tanto da temperatura exterior, Fig. 59, como da temperatura no início do tubo, Fig. 60.

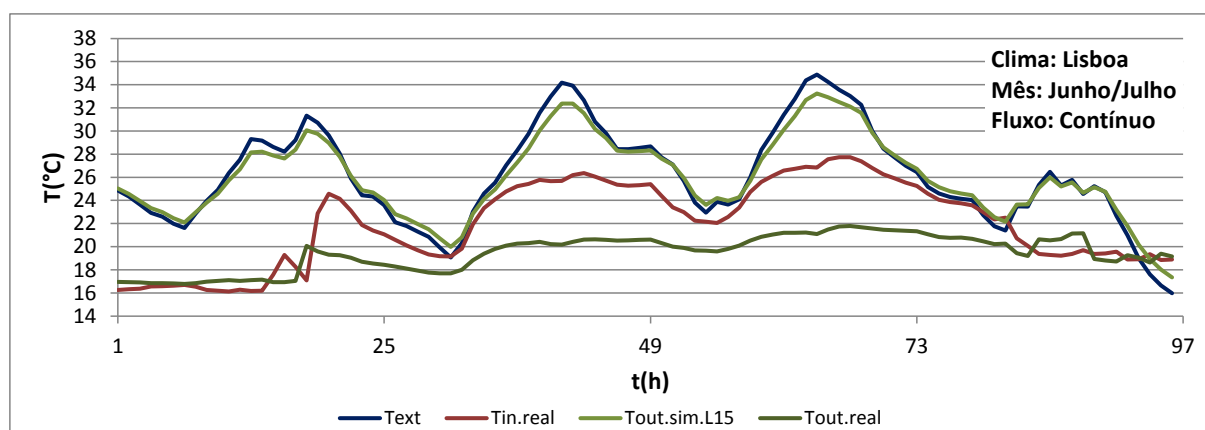


Fig. 59 - Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura exterior, Text, considerando L=15m.

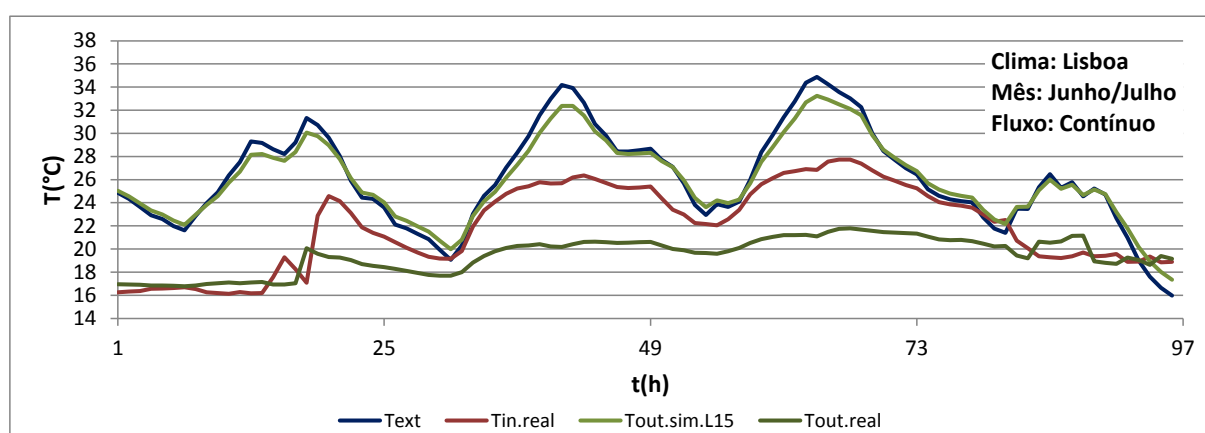


Fig. 60 – Simulação da temperatura de saída, Tout.sim, com base na temperatura de entrada, Tin.real, considerando L=15m.

Tal como se verificou na Fig. 56 e na Fig. 57, para a simulação que tem por base a temperatura no início do tubo os resultados obtidos aproximam-se dos resultados reais, contrariamente àquela que se baseia na temperatura exterior, para a qual se obtêm temperaturas muito elevadas que não refletem o real funcionamento do sistema.

As diferenças entre os resultados obtidos e os esperados podem ser explicados pelo facto dos resultados reais, para o regime total, contemplarem poucos dias de funcionamento e assim o sistema estar a funcionar ainda em fase de transição. Por outro lado, o facto dos dados meteorológicos utilizados (temperatura ambiente e radiação solar) não se referirem ao ano de 2013 (até à data) apenas deverá introduzir um pequeno erro e não resultados díspares, como os obtidos. Assim, pode-se dizer que os fenómenos de transferência de calor que ocorrem no poço de alimentação de ar são bastante importantes, pelo que não devem ser desvalorizados. Desta forma, para uma simulação mais realista, é necessário um especial cuidado com este elemento do sistema.

8. Conclusões

No desenvolvimento deste trabalho, a análise de simulações permitiu compreender melhor, não só os fenómenos inerentes ao funcionamento de sistemas de tubos enterrados, mas também a dificuldade de definição de um só método eficaz e aplicável no tratamento de resultados de todos os casos.

A aplicação do método de Fourier para análise de resultados foi a opção que permitiu a aquisição de resultados dependentes da geometria e frequência (anual ou diária) mas independentes do clima. Embora a este método associem-se problemas de sobrestimação ou subestimação, estes revelam-se pouco relevantes visto que um modelo de dimensionamento simplificado apenas dará ideia daquilo que se poderá obter na realidade. Para a obtenção de dados mais precisos dever-se-á recorrer, sempre, a simulações numéricas mais completas, como o modelo *Type 460*.

Utilizando o método de Fourier, o estudo do efeito das condições fronteira, apenas com fluxo contínuo, permitiu a obtenção de resultados possíveis de serem utilizados como regras de dimensionamento em modelos simplificados.

Ainda relativamente às condições fronteira, a consideração de absorção solar tem uma influência significativa no funcionamento do sistema. Expostos a radiação, os sistemas podem não ser capazes de arrefecer devidamente o ar de entrada, sendo aconselhado repensar no seu dimensionamento e advertir para o cuidado em localizar os tubos numa zona sombreada ou sem exposição solar intensa.

Por outro lado, a análise dos regimes de funcionamento a caudal variável revelou-se mais complexa na medida em que o Método de Fourier não é aplicável. Assim, recorreu-se ao Método dos Mínimos Quadrados, que sendo extremamente sensível aos picos de temperatura, não permitiu a obtenção de resultados independentes dos climas, sobretudo no caso da geometria *Compact Pipes*, em termos de atenuação anual, uma vez que, esta é a geometria mais exposta aos fatores externos.

Tendo em conta que os resultados para os climas típicos, quando aplicado o método de Fourier, aproximam-se dos resultados obtidos para o clima virtual e que, seja pelo Método de Fourier, seja pelo Método dos Mínimos Quadrados, a análise do clima virtual conduz a resultados semelhantes, propõe-se que o clima virtual pode ser, por si só, o princípio para o tratamento dos casos de fluxo descontínuo. Desta forma, sugere-se, como trabalho futuro, a investigação deste método ou de outros métodos que permitam a análise e a obtenção de dados possíveis de serem aplicados como regras para modos de funcionamento com caudal descontínuo ao longo do ano.

A abordagem comparativa entre o modelo analítico e o modelo de simulação numérica permitiu concluir que os dados resultantes do modelo analítico constituem uma boa aproximação do que se pode obter por simulação numérica.

Relativamente ao sistema de tubos enterrados do edifício Solar XXI, conclui-se que todo o trabalho de arrefecimento de ar ocorre no poço de ar. De modo a compreender melhor os fenómenos inerentes ao seu funcionamento, são necessárias simulações cuidadas do poço de ar, bem como medições mais detalhadas, como por exemplo, medição da velocidade do ar ao longo da largura do poço, o que constitui investigação para trabalho futuro.

9. Bibliografia

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007-Synthesis Report*. Acedido em 20 de Agosto de 2013, em: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm
- [2] *Energy2020*. Acedido em 20 de Agosto de 2013, em: http://ec.europa.eu/energy/publications/index_en.htm
- [3] European Commission. *Europe 2020*. Acedido em 20 de Agosto de 2013, em: http://ec.europa.eu/europe2020/index_en.htm
- [4] International Energy Agency. (2007). *Renewables for Heating and Cooling*. Acedido em 20 de Agosto de 2013, em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,3749,en.html>
- [5] Euroheat & Power. (2006). *The European Cold Market (Work package 2)*. Acedido em 12 de Junho de 2013, em: <http://www.euroheat.org/files/filer/ecoheatcool/project.htm>
- [6] Eurostat. Acedido em 21 de Agosto de 2013, em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=ten00094>
- [7] Ecofys, Politecnico di Milano, eERG, University of Wuppertal. (2013, Fevereiro). *Towards nearly zero-energy buildings. Definition of common principles under the EPBD*. Acedido em 20 de Agosto de 2013, em: http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/implementation_en.htm
- [8] Hollmuller, P. (2002). *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*. Thèse de doctorat. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie-Université de Genève, Genève. 125pp.
- [9] Barnard, N. & Jaunzens, D. (2001). *Annex 28 Low Energy Cooling: Technology Selection and Early Design Guidance*. Acedido em 12 de Junho de 2013, em: <http://www.ecbcs.org/annexes/annex28.htm>
- [10] Hollmuller, P. & Lachal, B. (n.d.). *Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: potentials and constraints, design guidelines, system integration and global energy balance*.
- [11] Hollmuller, P. (2003). Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 4303-4317.
- [12] EnergyPlus. Acedido em 4 de Fevereiro de 2013 em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm
- [13] Incropera, F., Lavine, A. & DeWitt, D. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer*. Sixth Edition, John Wiley & Sons. United States of America.
- [14] LNEG, Laboratório Nacional de Energia e Geologia. (2010). *Solar XXI. Em direcção à energia zero*. Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento. Lisboa.

Anexos

Anexo A - Gráficos de dispersão: T0Med vs T50Med, para o clima de Lisboa.

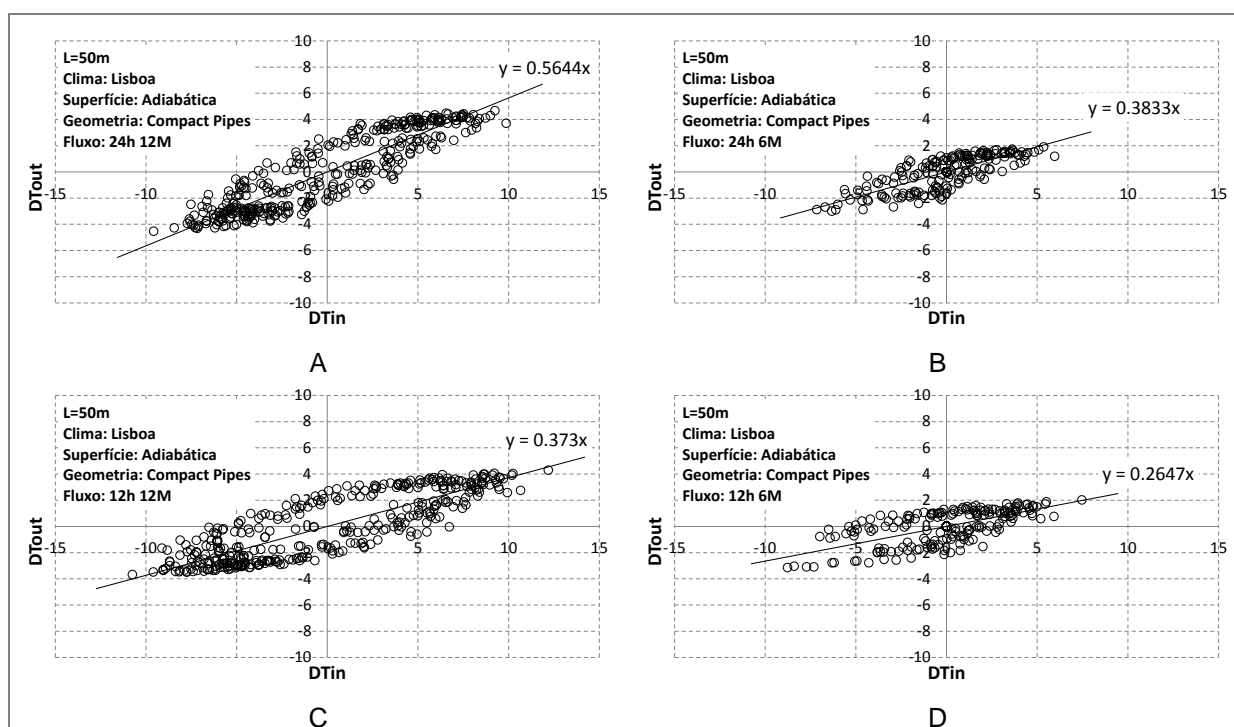


Fig. A1 - Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em $T50Med$, para A. 24h12M B. 24h6M C. 12h12M e D. 12h6M.

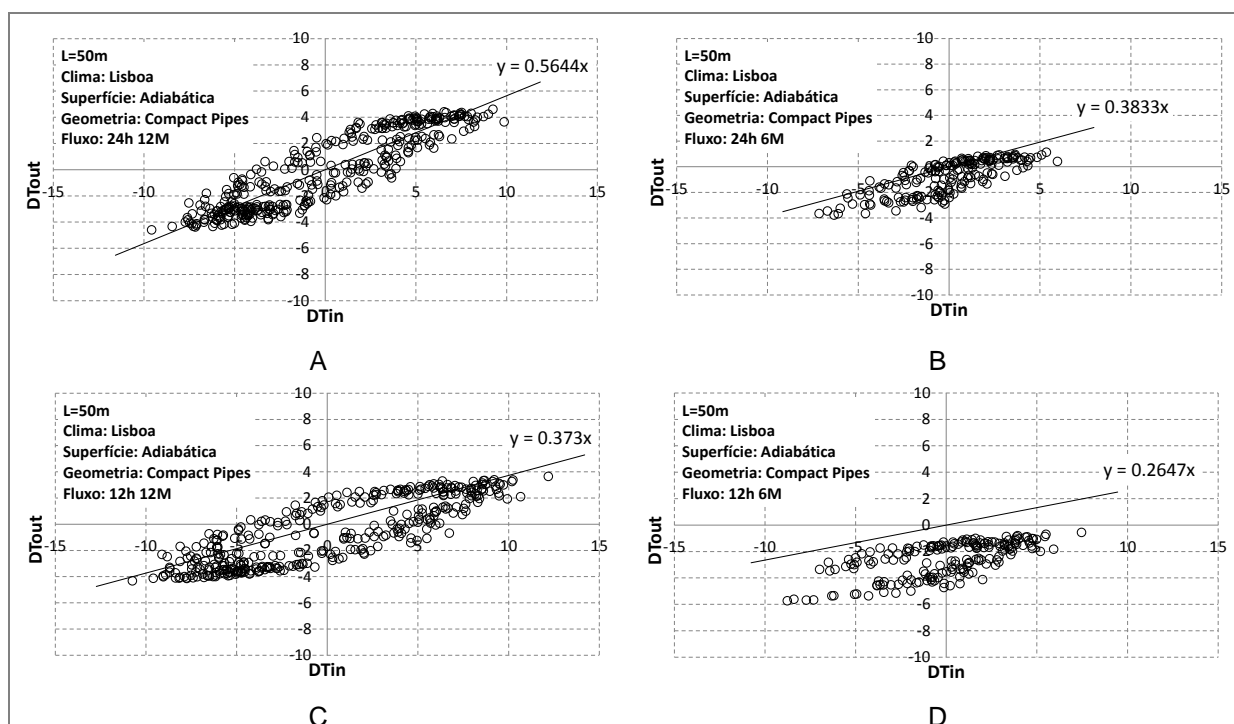


Fig. A2 - Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em $T0Med$, para A. 24h12M B. 24h6M C. 12h12M e D. 12h6M.

Anexo B - Gráficos de dispersão: T0Med vs T50Med, para o clima de Genebra

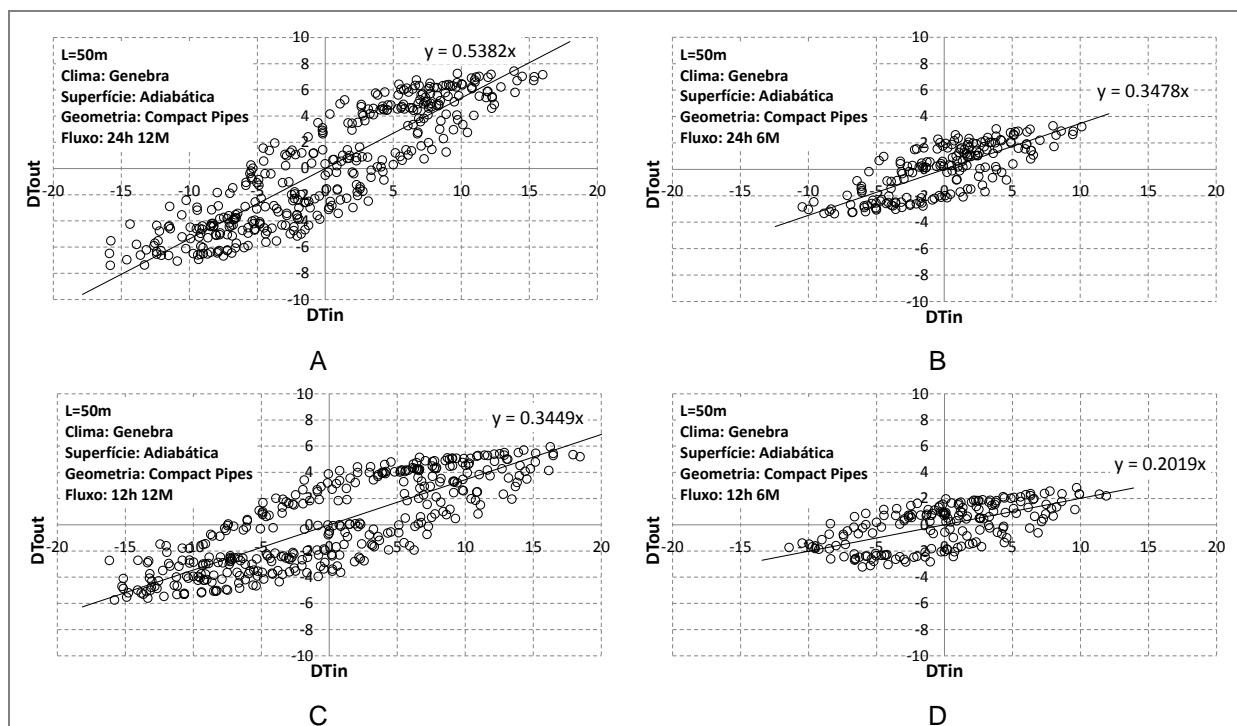


Fig. B1 - Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em T_{50Med} , para A. 24h12M B.24h6M C.12h12M e D.12h6M.

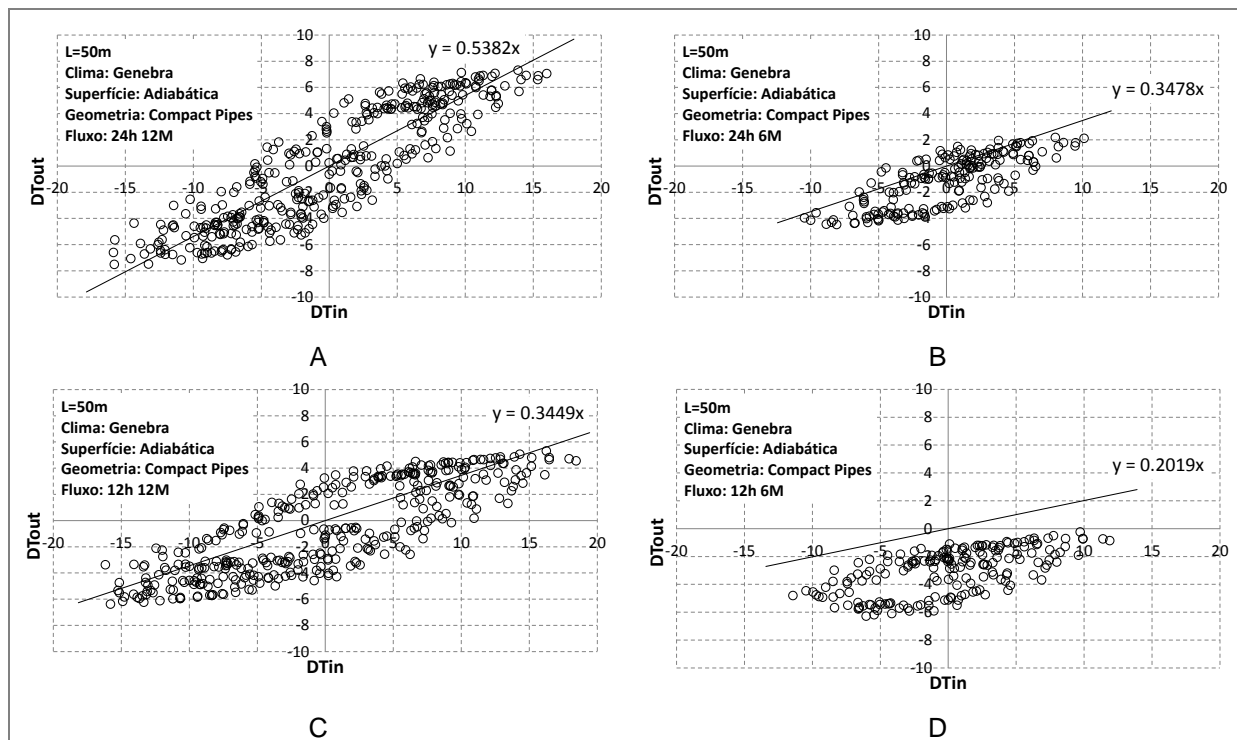


Fig. B2 - Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em T_{0Med} , para A. 24h12M B.24h6M C.12h12M e D.12h6M.

Anexo C - Gráficos de dispersão: T0Med vs T50Med, para o clima de São Paulo.

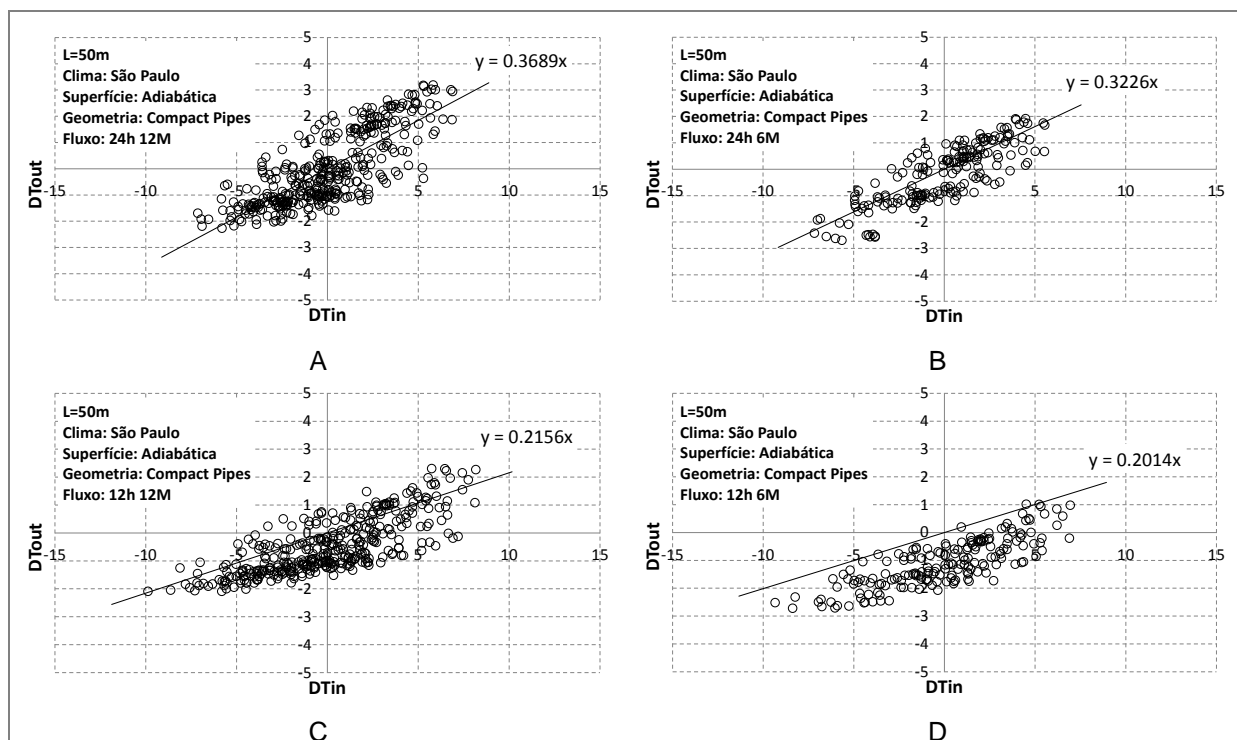


Fig. C1 - Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em $T50Med$, para A. 24h12M B.24h6M C.12h12M e D.12h6M.

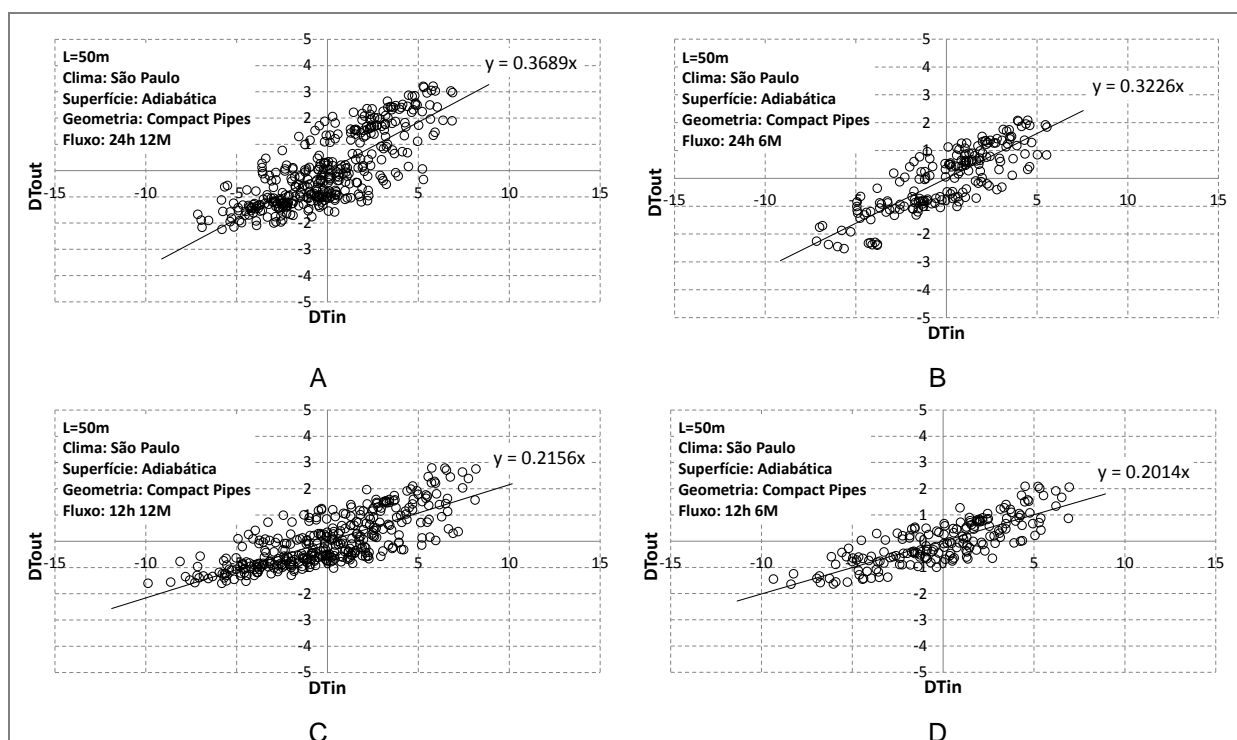


Fig. C2 - Gráficos de dispersão resultantes do cálculo de DT_{out} com base em $T0Med$, para A. 24h12M B.24h6M C.12h12M e D.12h6M.

Anexo D - Gráficos de dispersão: vigésimo ano de funcionamento para o clima de Lisboa

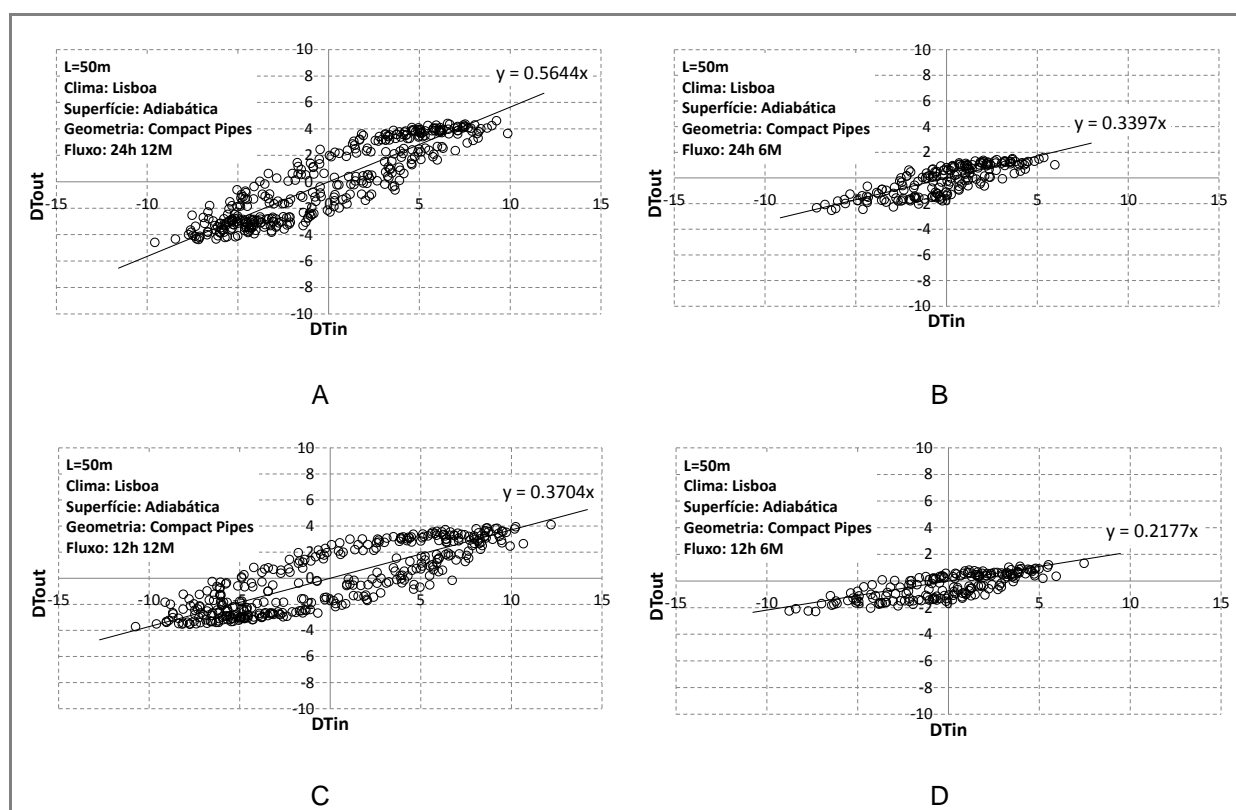


Fig. D1 - Gráficos de dispersão para o vigésimo ano de funcionamento, para A. 24h12M B. 24h6M C. 12h12M e D. 12h6M e superfície adiabática.

Anexo E - Gráficos de dispersão: vigésimo ano de funcionamento para o clima de Genebra

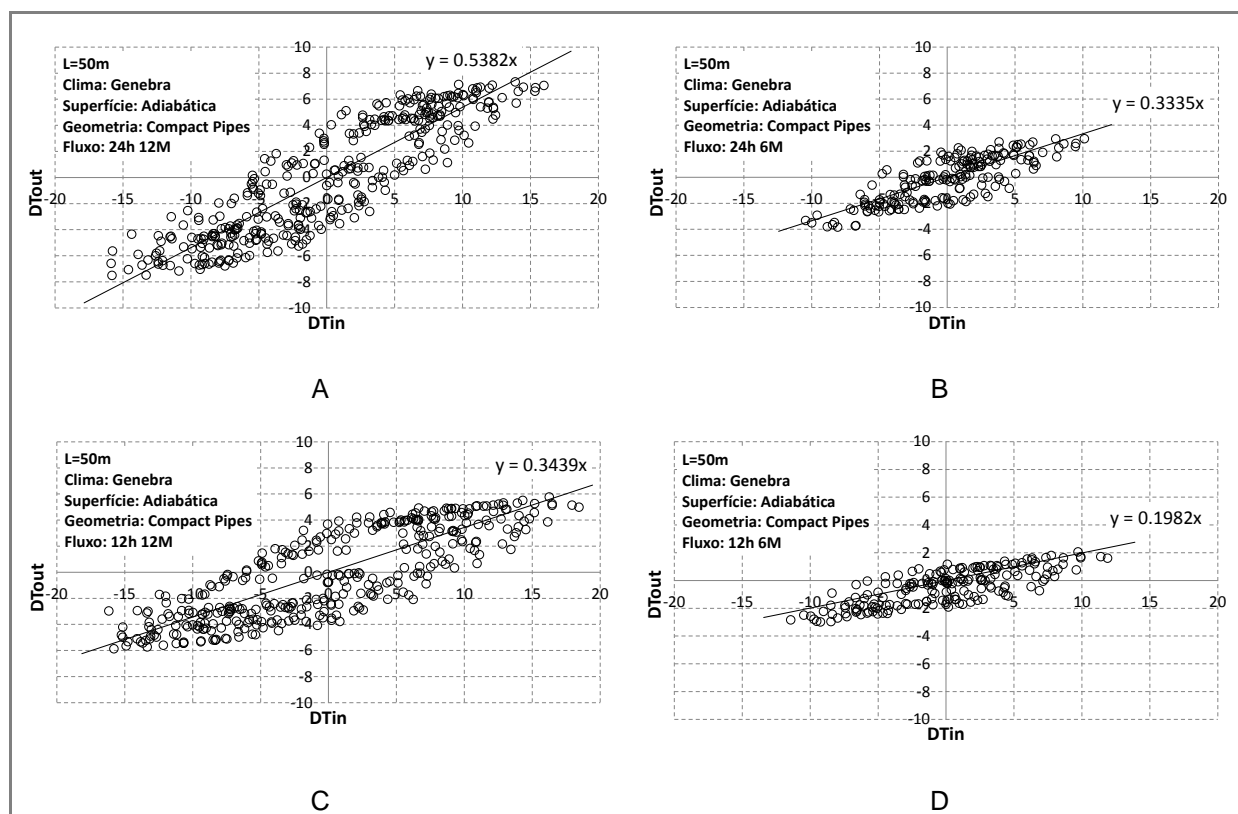


Fig. E1 - Gráficos de dispersão para o vigésimo ano de funcionamento, para **A.** 24h12M **B.** 24h6M **C.** 12h12M e **D.** 12h6M e superfície adiabática.

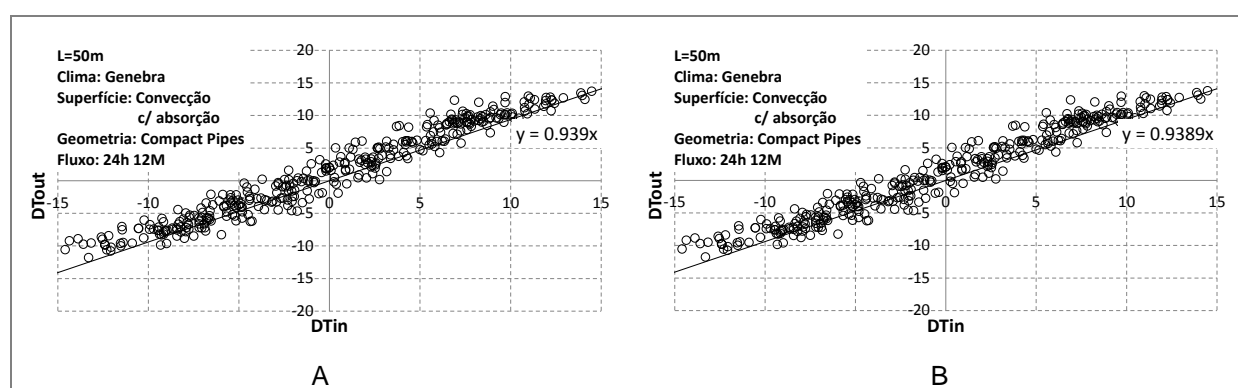


Fig. E2 - Gráficos de dispersão para o **A.** segundo ano de funcionamento e para o **B.** vigésimo ano de funcionamento e superfície com convecção e absorção solar.

Anexo F - Gráficos de dispersão: vigésimo ano de funcionamento para o clima de São Paulo

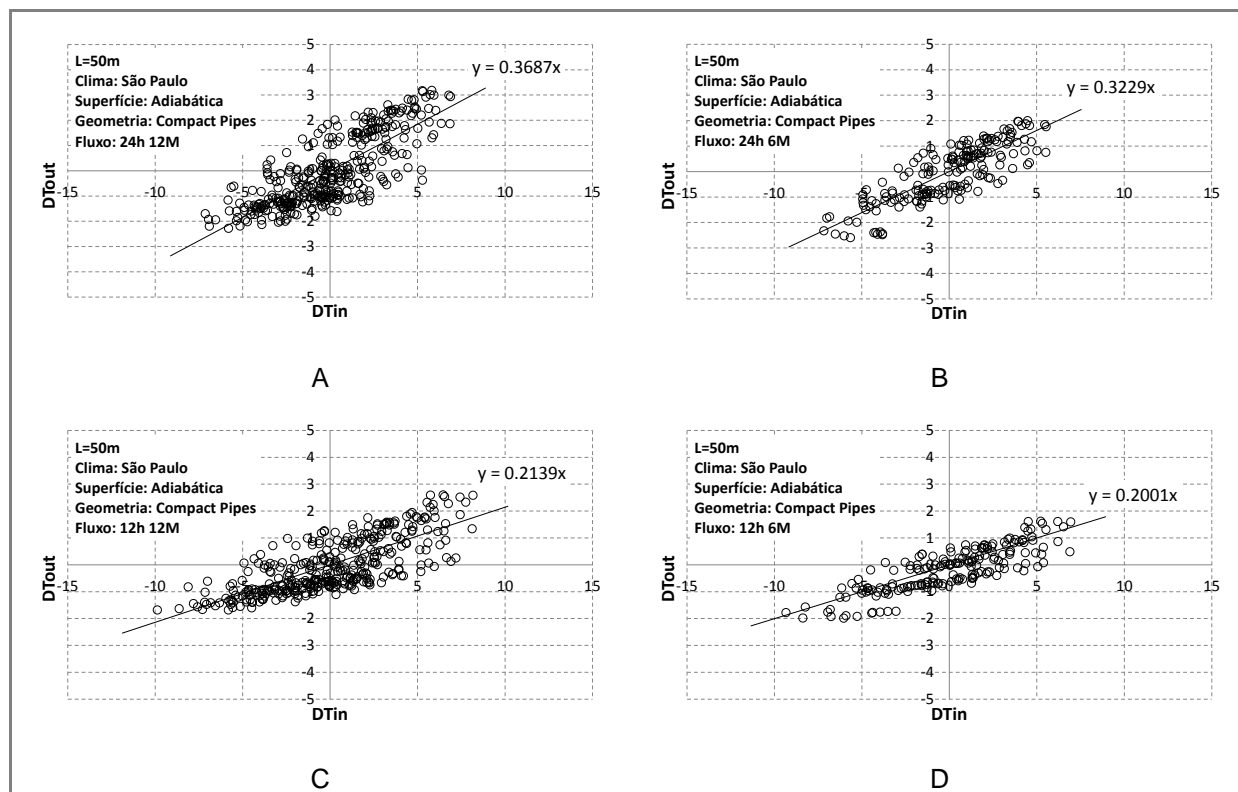


Fig. F1 - Gráficos de dispersão para o vigésimo ano de funcionamento, para **A.** 24h12M **B.** 24h6M **C.** 12h12M e **D.** 12h6M e superfície adiabática.

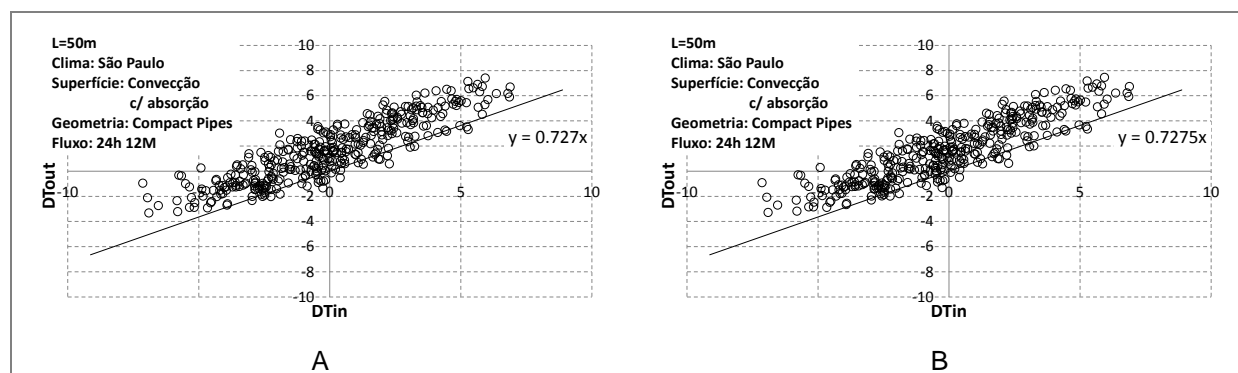


Fig. F2 - Gráficos de dispersão para o **A.** segundo ano de funcionamento e para o **B.** vigésimo ano de funcionamento e superfície com convecção e absorção solar.

Anexo G – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria *Compact Pipes* e clima de Lisboa

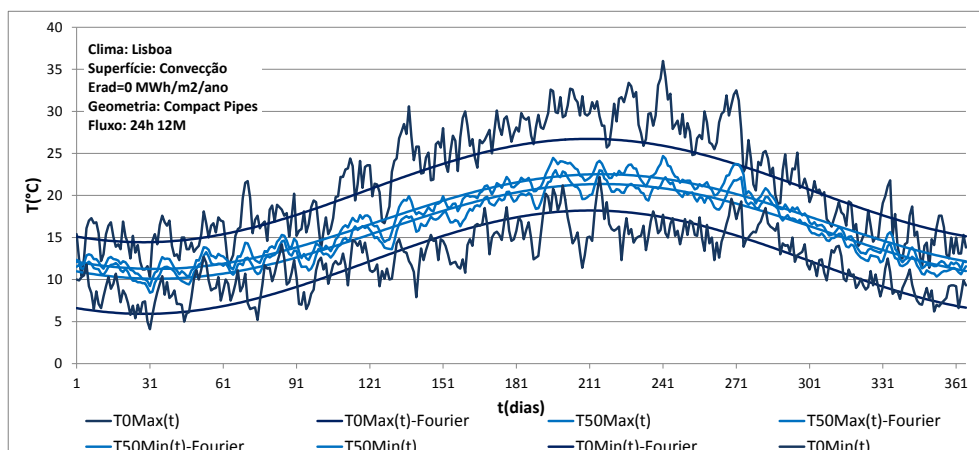


Fig. G1 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção.

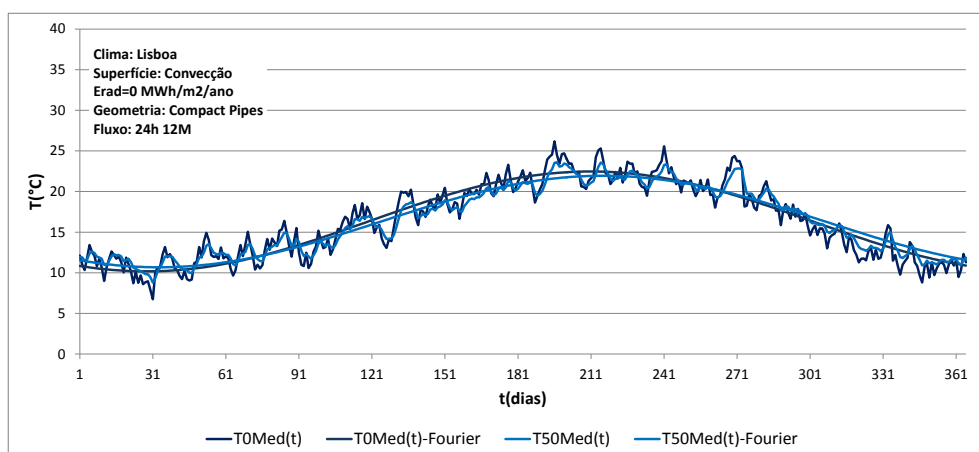


Fig. G2 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção.

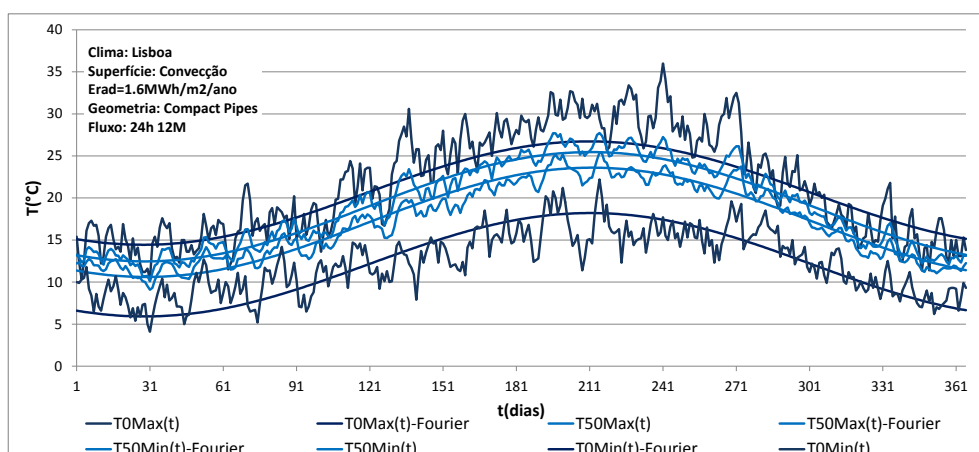


Fig. G3 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção.

Anexo H – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria *Compact Pipes* e clima de Genebra

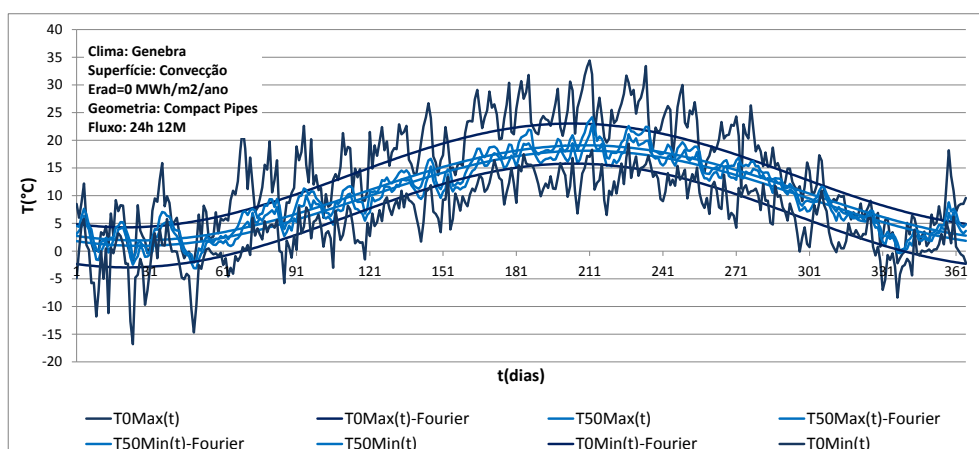


Fig. H1 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção.

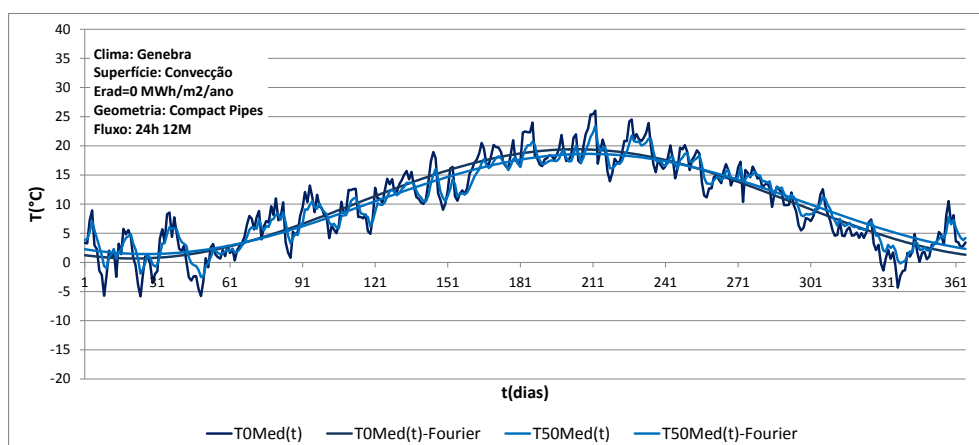


Fig. H2 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção.

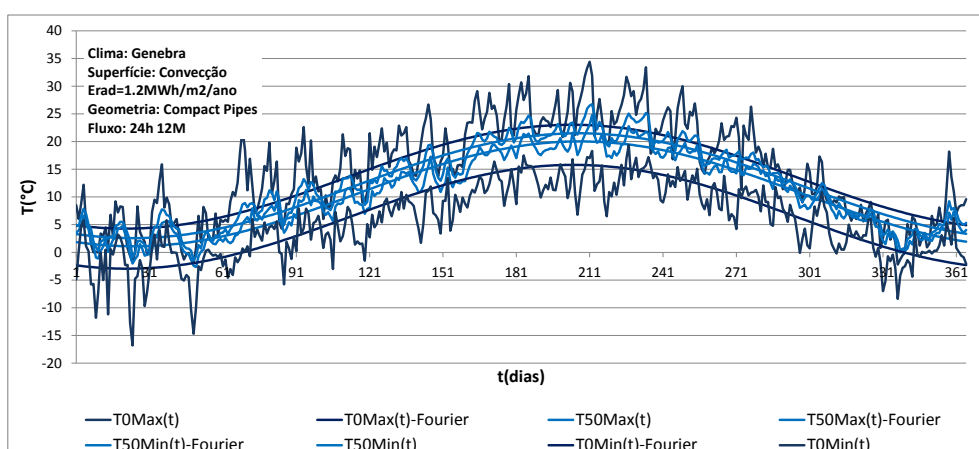


Fig. H3 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção.

Anexo I – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria *Compact Pipes* e clima de São Paulo

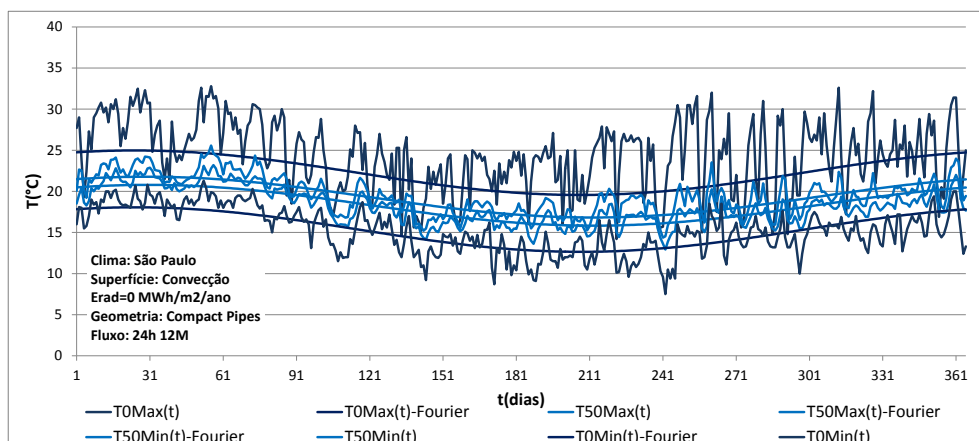


Fig. I1 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

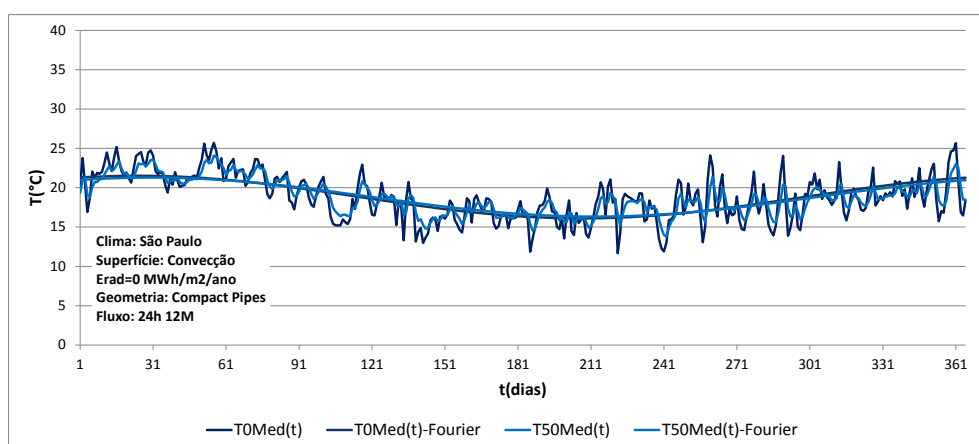


Fig. I2 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

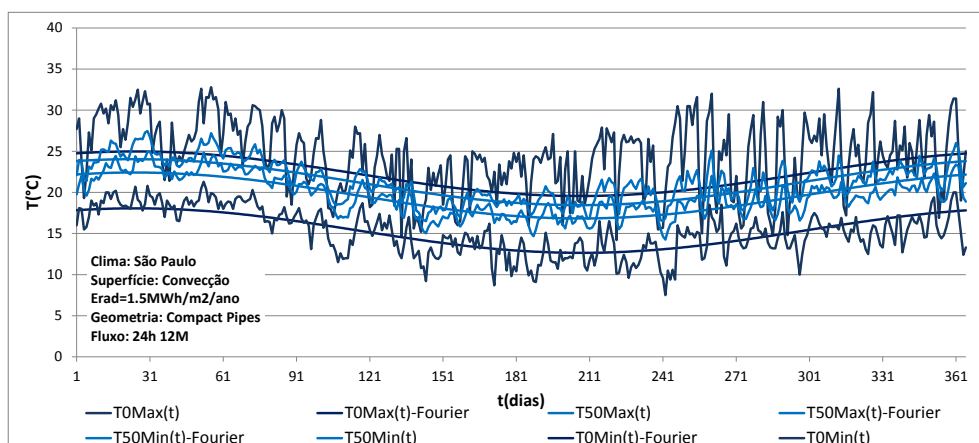


Fig. I3 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção solar.

Anexo J – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria *Distant Pipes* e clima de Lisboa

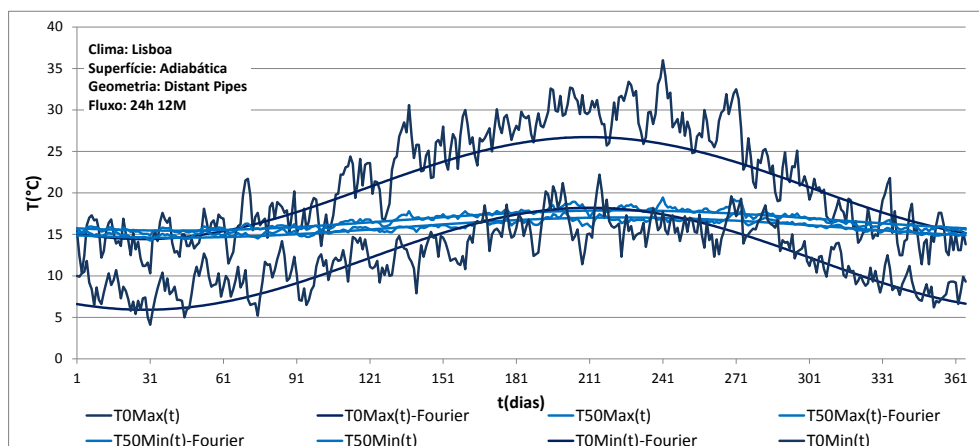


Fig. J1 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície adiabática.

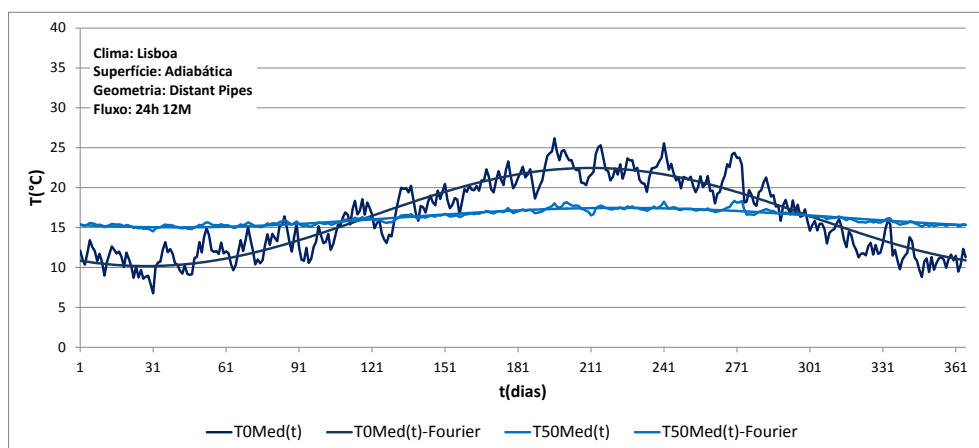


Fig. J2 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície adiabática.

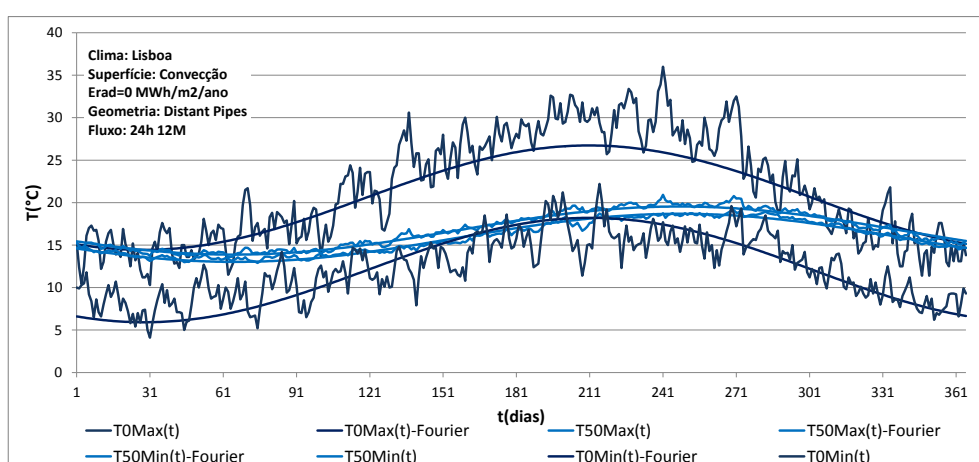


Fig. J3 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

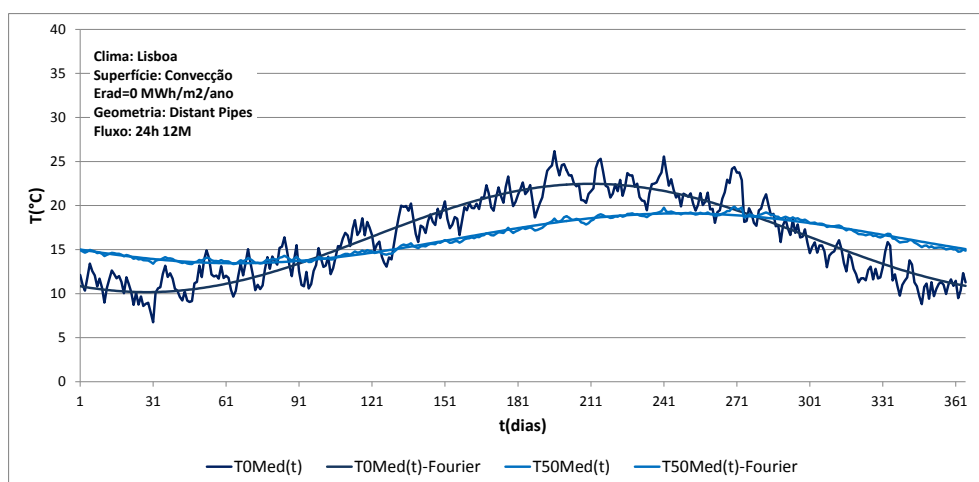


Fig. J4 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

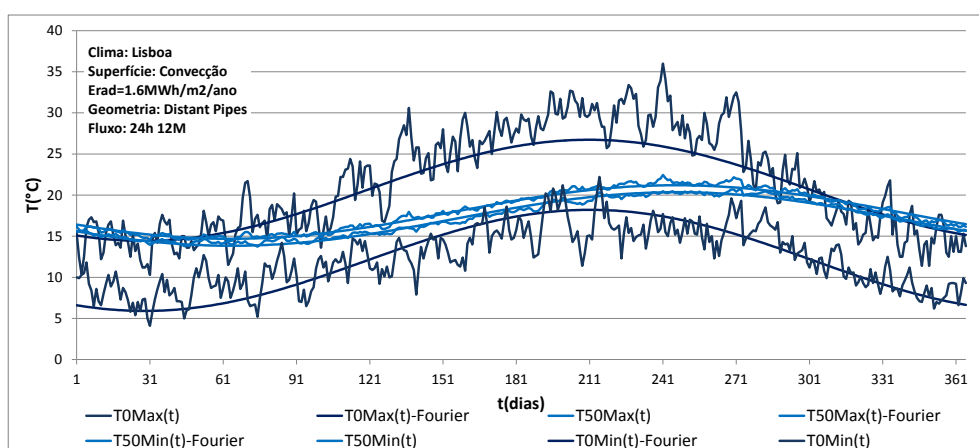


Fig. J5 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção solar.

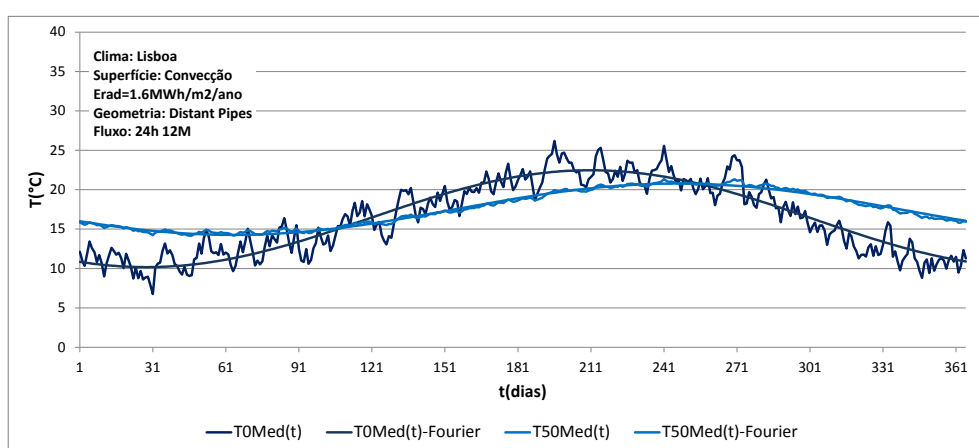


Fig. J6 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção solar.

Anexo K – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria *Distant Pipes* e clima de Genebra

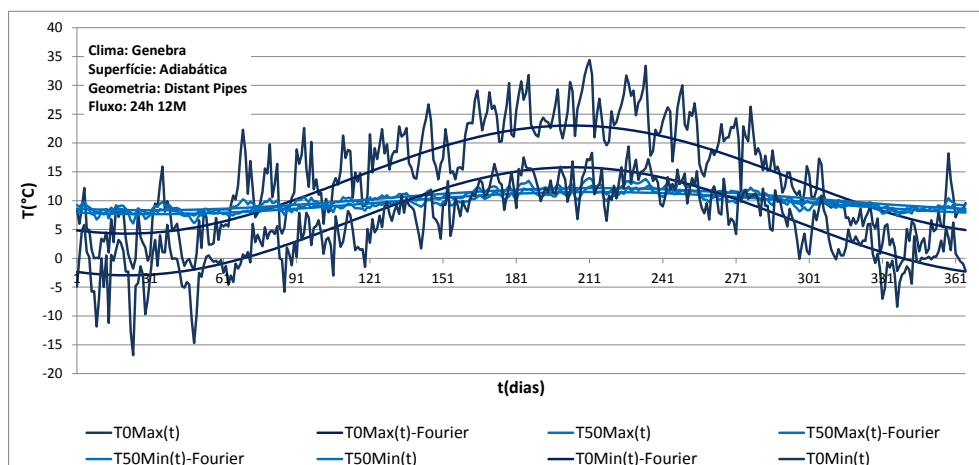


Fig. K1 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície adiabática.

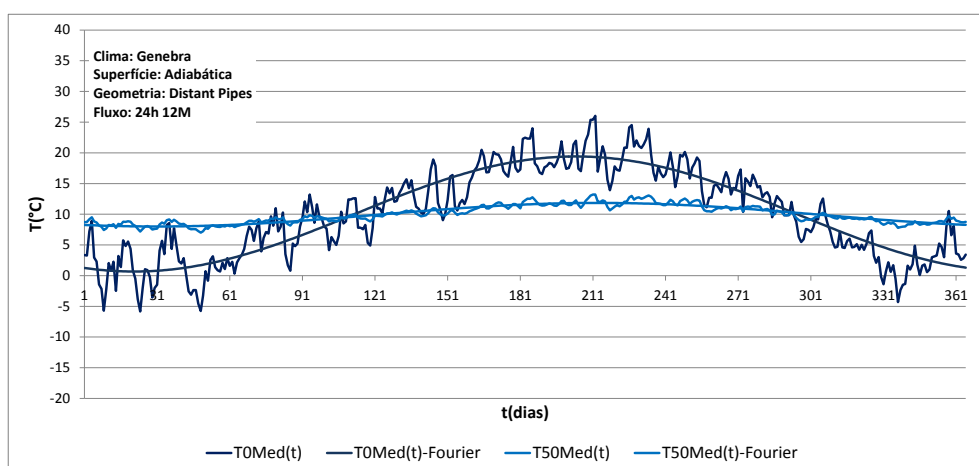


Fig. K2 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície adiabática.

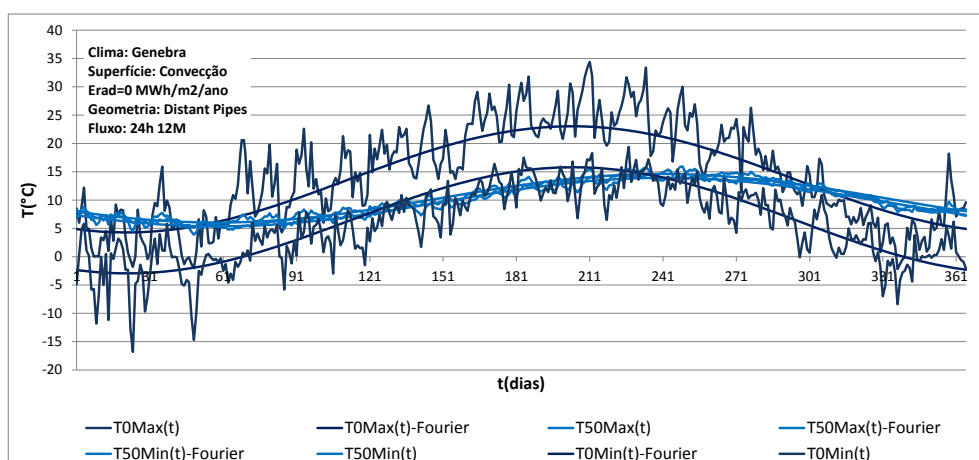


Fig. K3 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

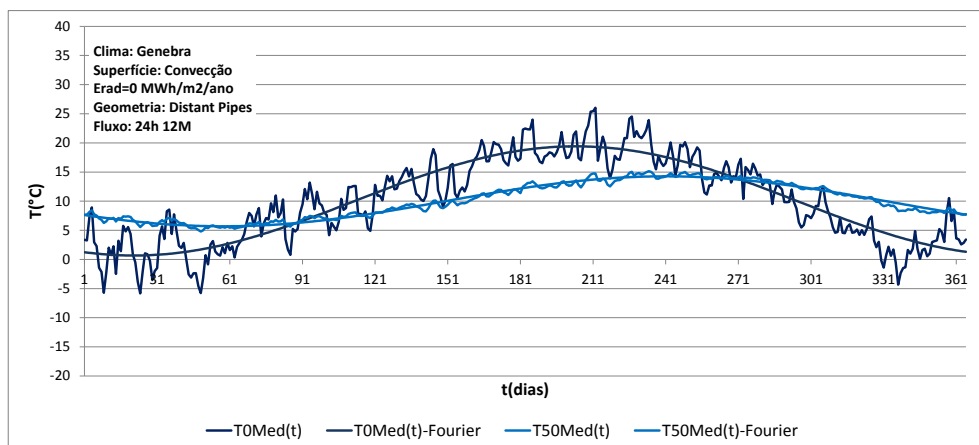


Fig. K4 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

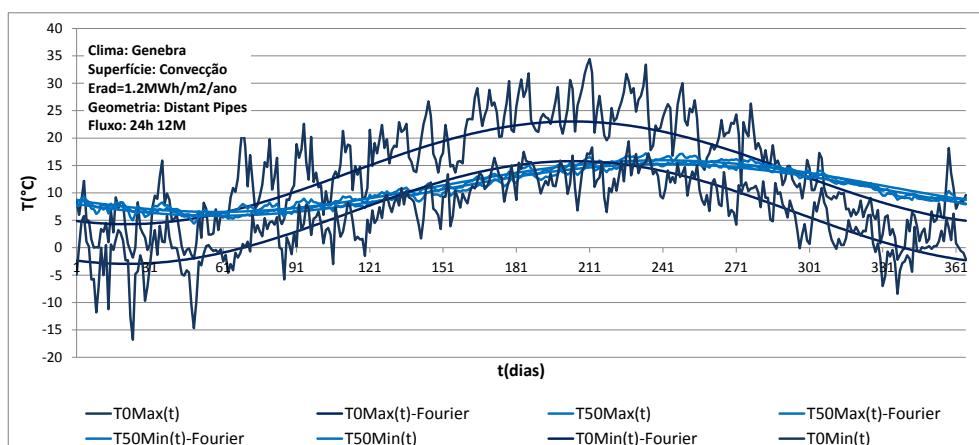


Fig. K5 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção solar.

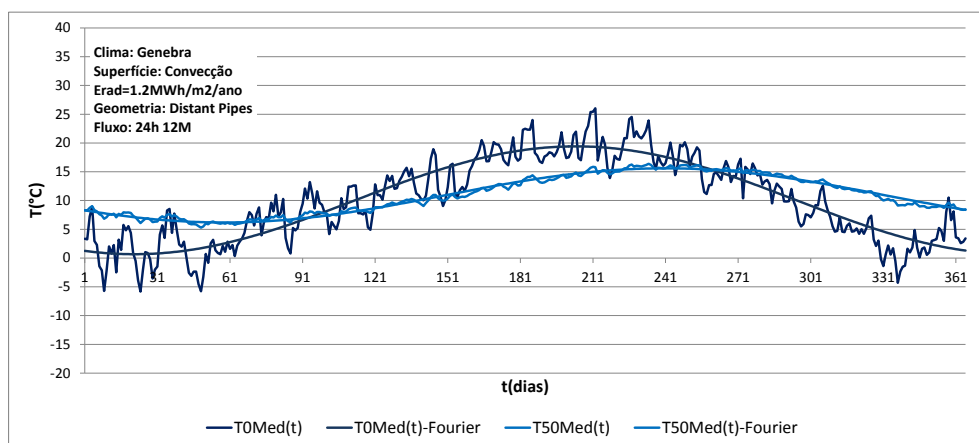


Fig. K6 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção solar.

Anexo L – Análise de extremos diários e temperaturas médias do ar pelo método de Fourier: geometria *Distant Pipes* e clima de São Paulo

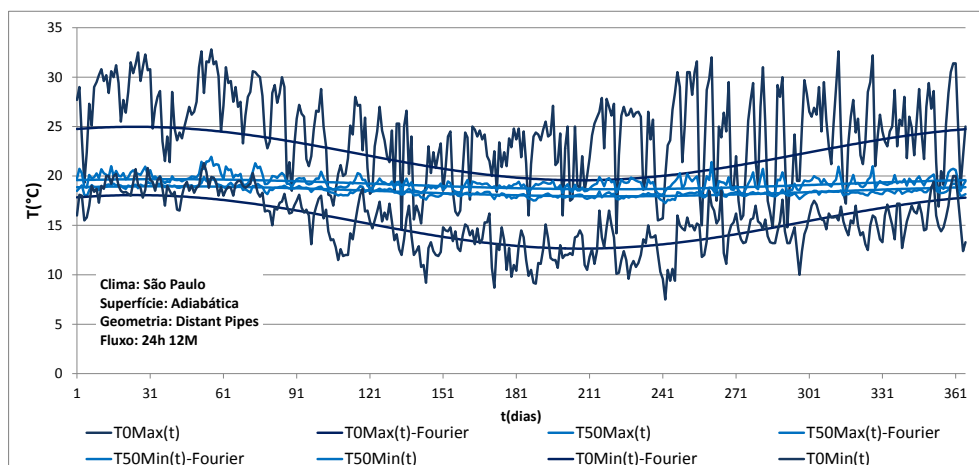


Fig. L1 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície adiabática.

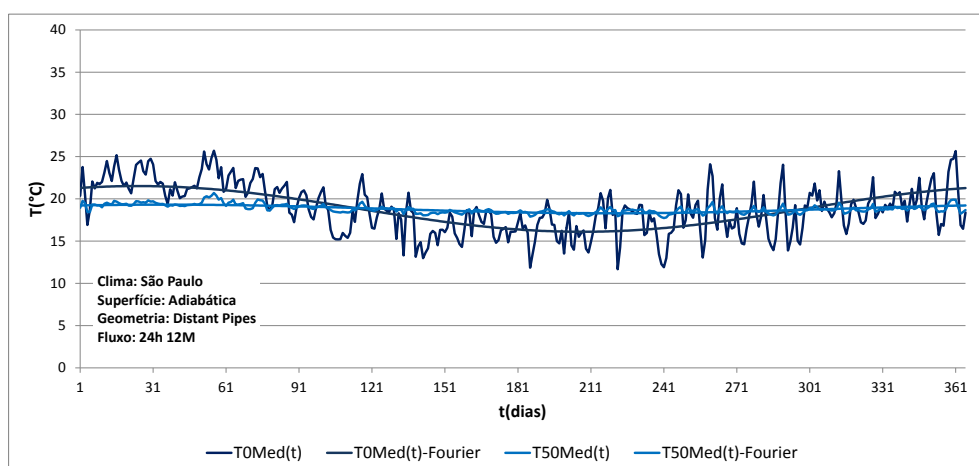


Fig. L2 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície adiabática.

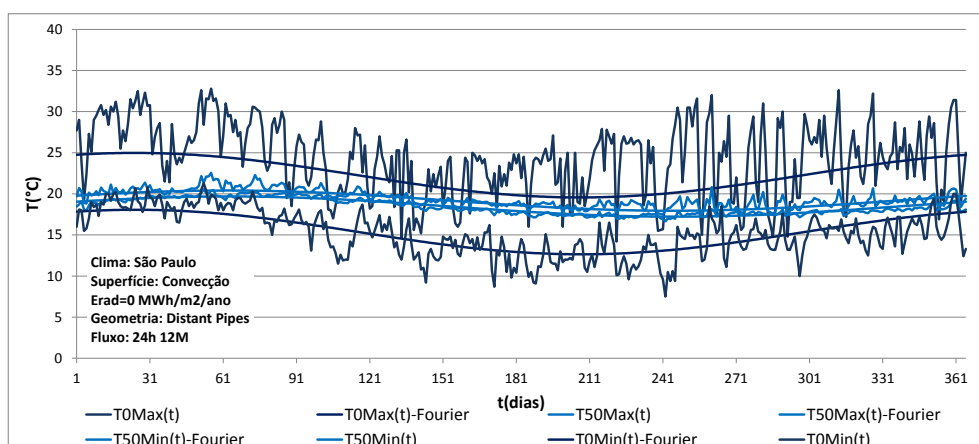


Fig. L3 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

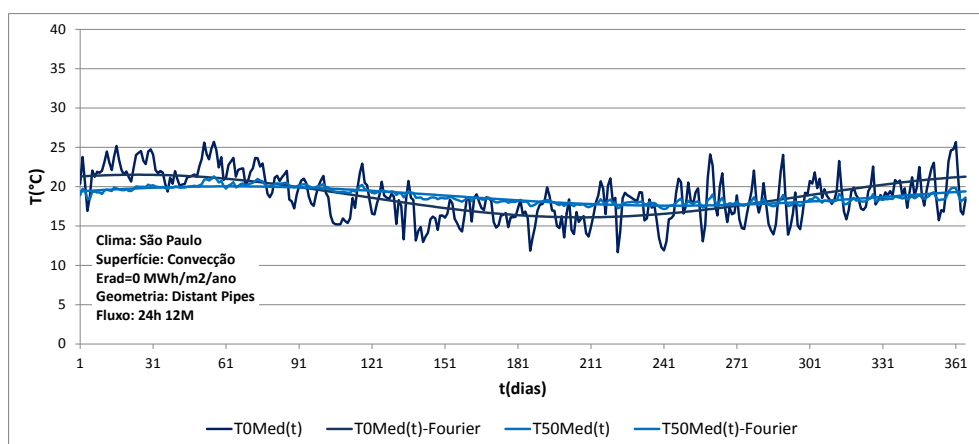


Fig. L4 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier para superfície com convecção sem absorção solar.

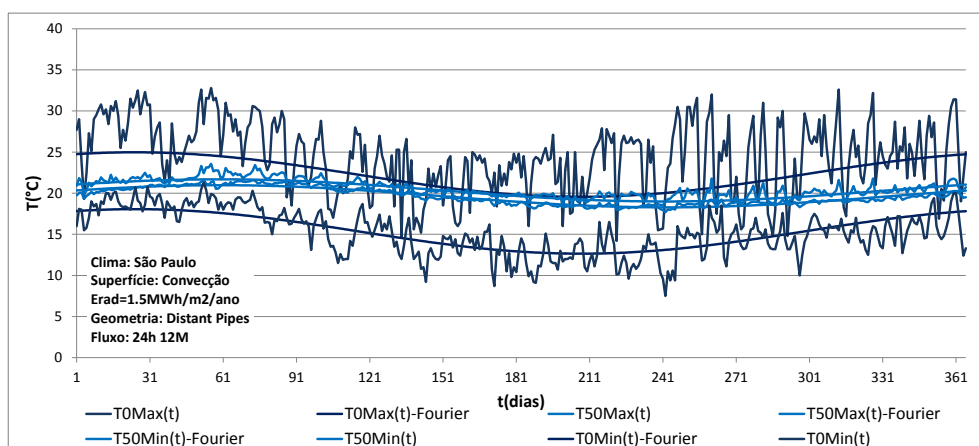


Fig. L5 - Extremos diários de temperatura simulados e por análise de Fourier para superfície com convecção com absorção solar.

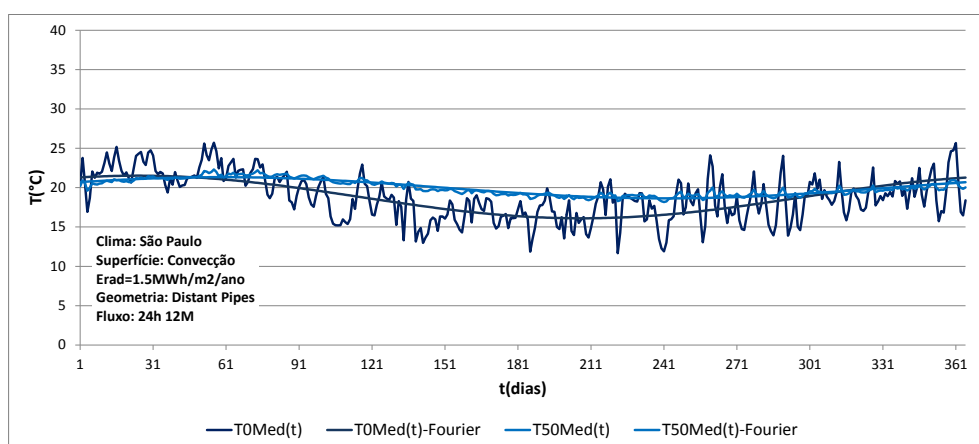


Fig. L6 - Temperatura média diária simulada e por análise de Fourier com superfície para superfície com convecção com absorção solar.

Anexo M - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Compact Pipes* e clima Virtual

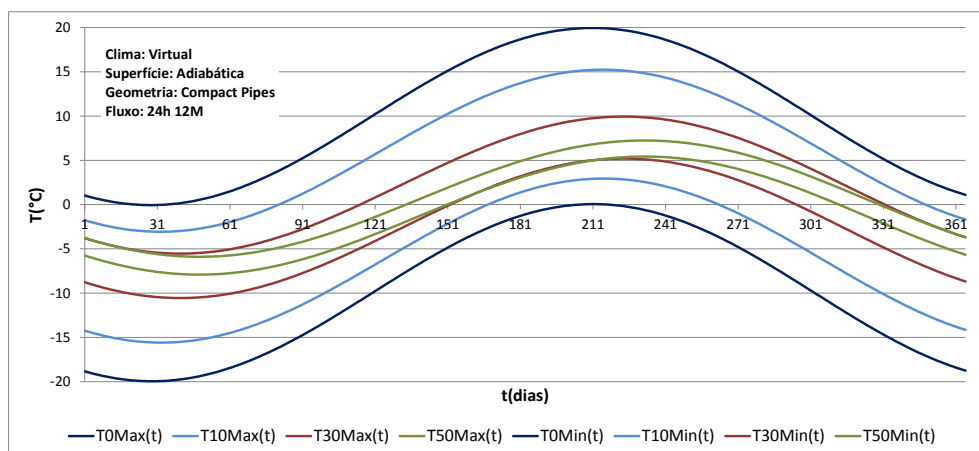


Fig. M1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

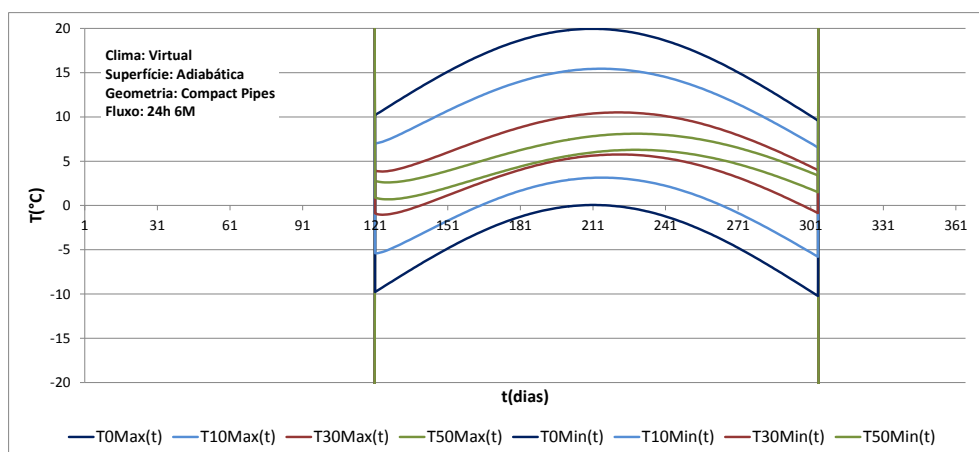


Fig. M2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

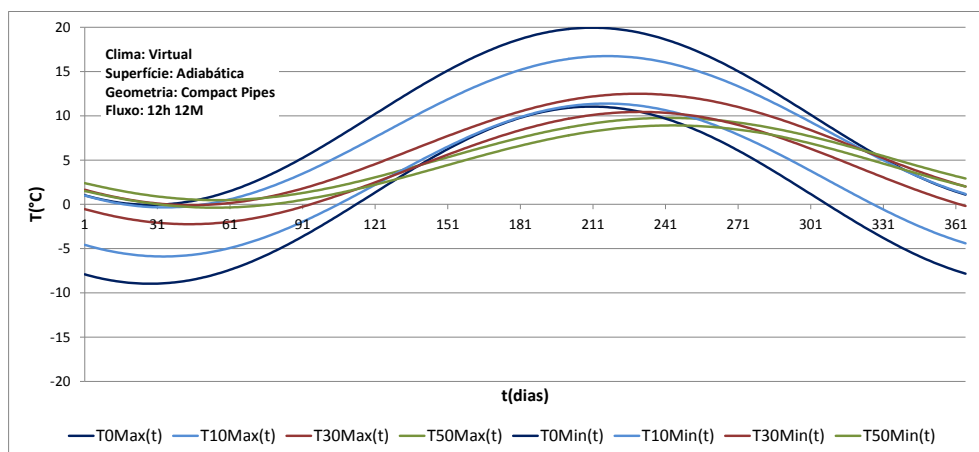


Fig. M3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

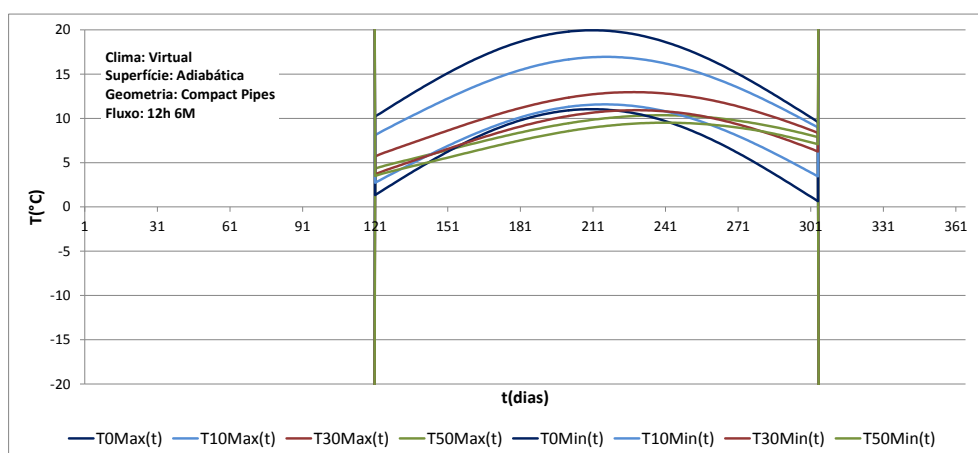


Fig. M4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

Anexo N – Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Compact Pipes* e clima de Lisboa

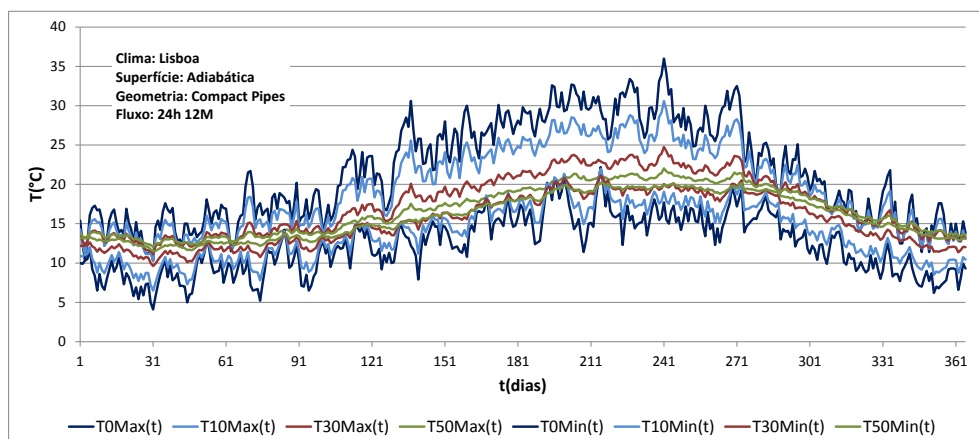


Fig. N1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

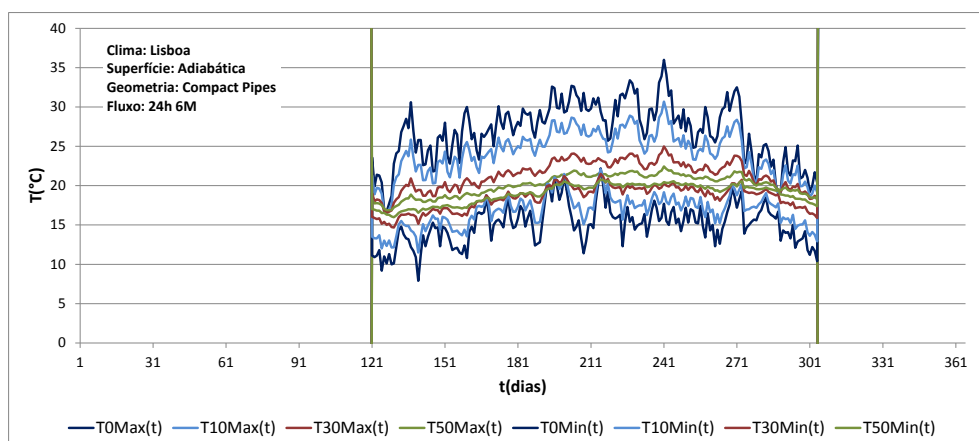


Fig. N2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

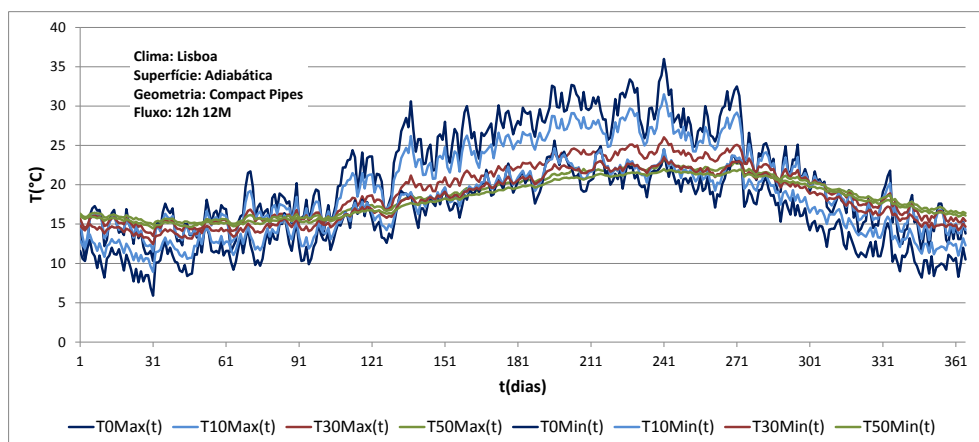


Fig. N3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

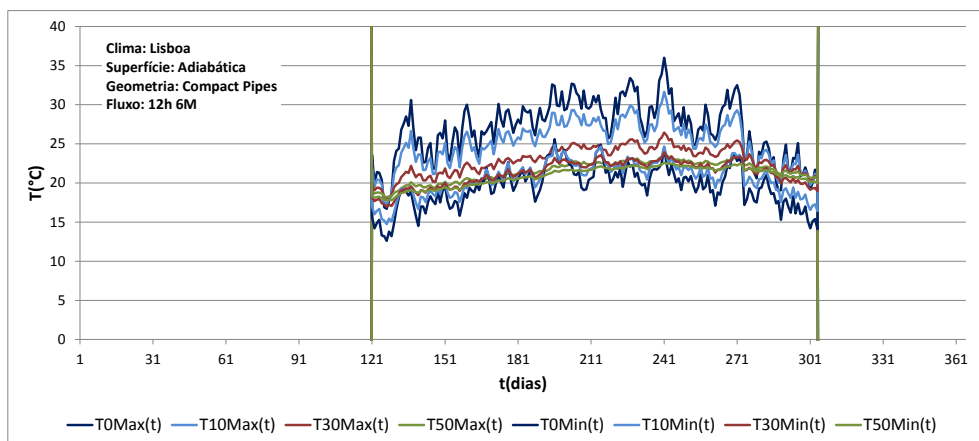


Fig. N4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

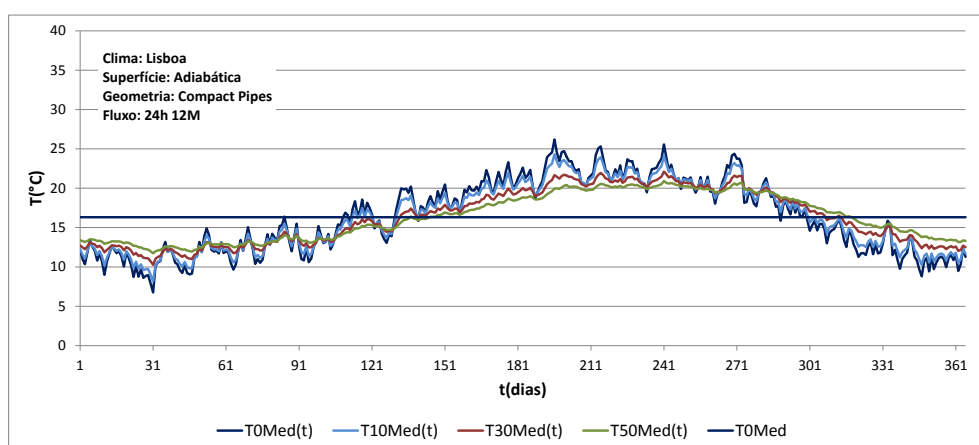


Fig. N5 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

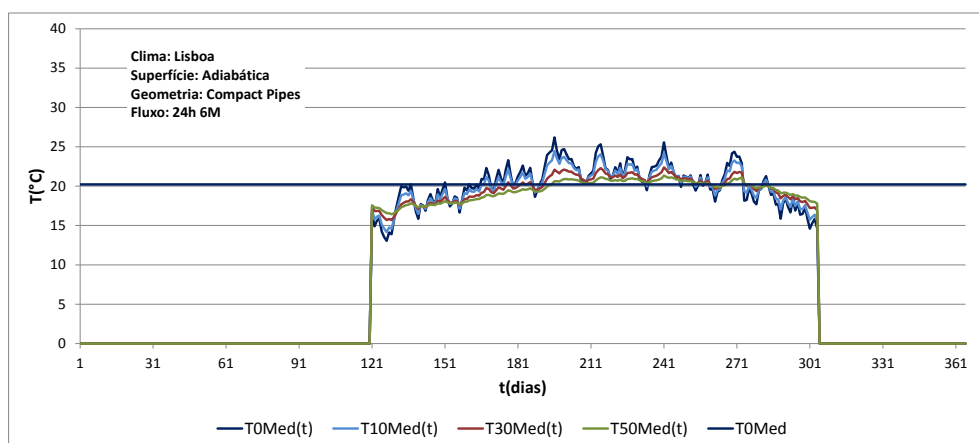


Fig. N6 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

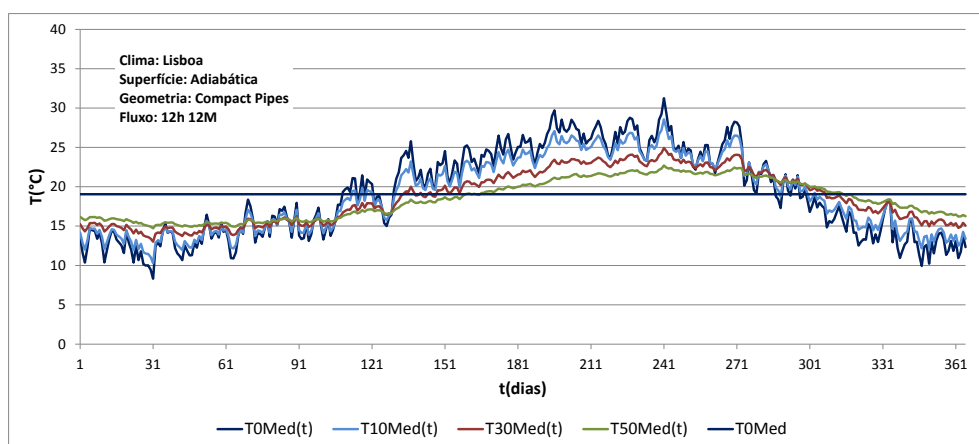


Fig. N7 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

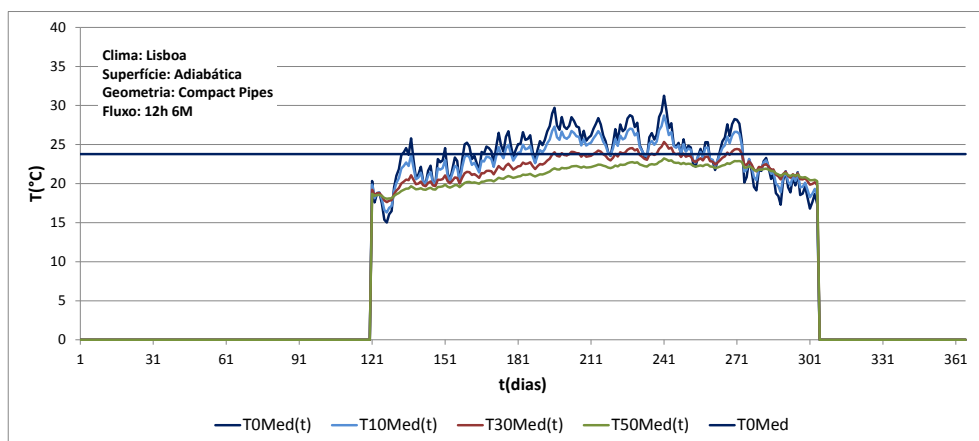


Fig. N8 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

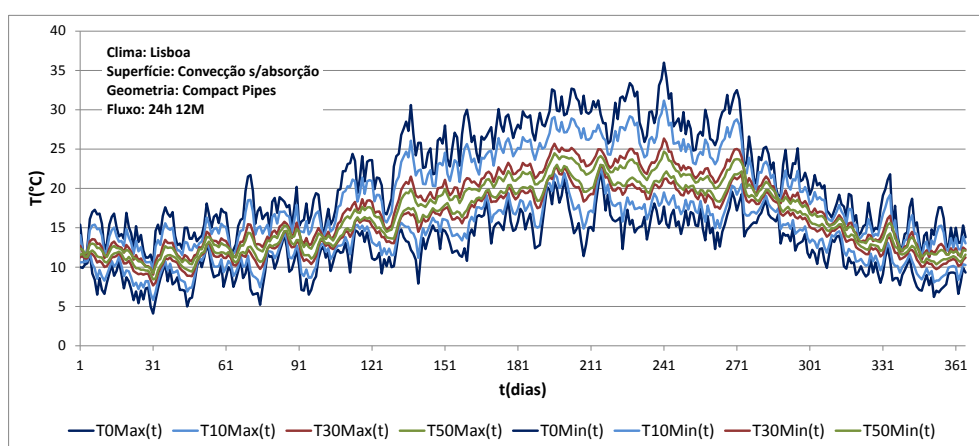


Fig. N9 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M.

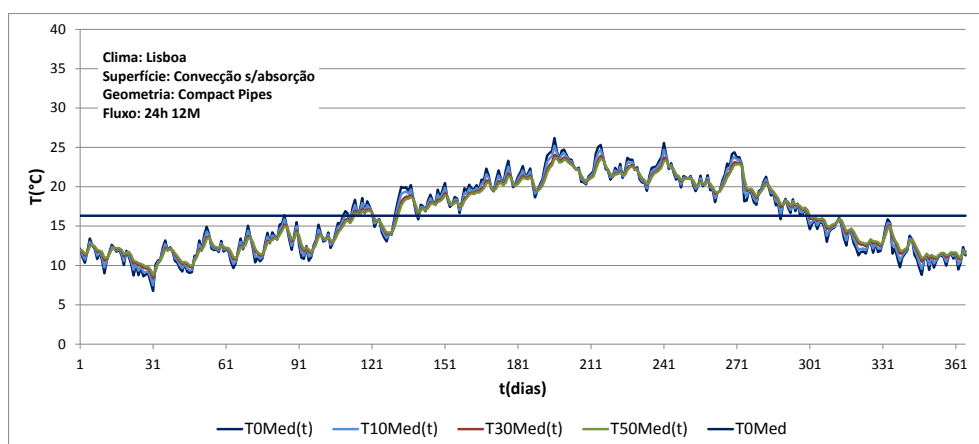


Fig. N10 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

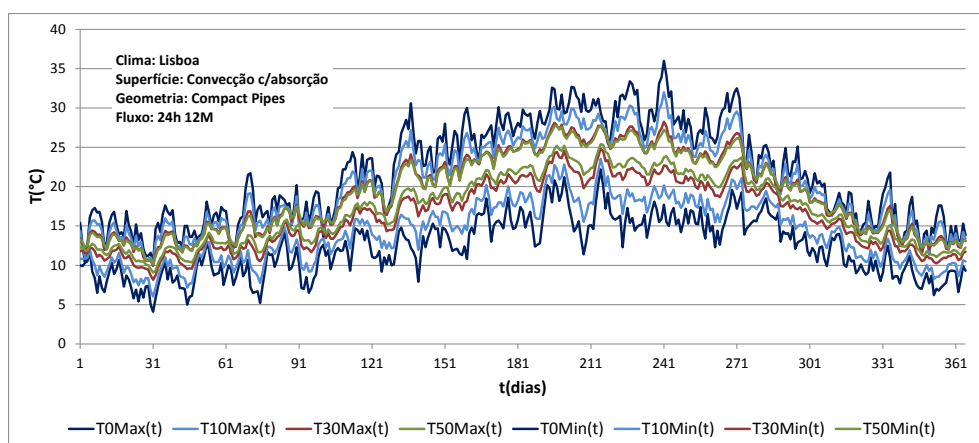


Fig. N11 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M

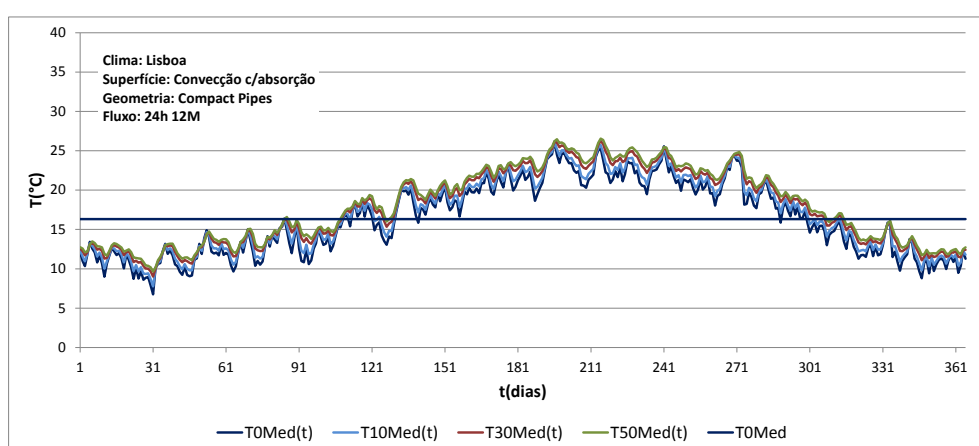


Fig. N12 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M

Anexo O - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Compact Pipes* e clima de Genebra

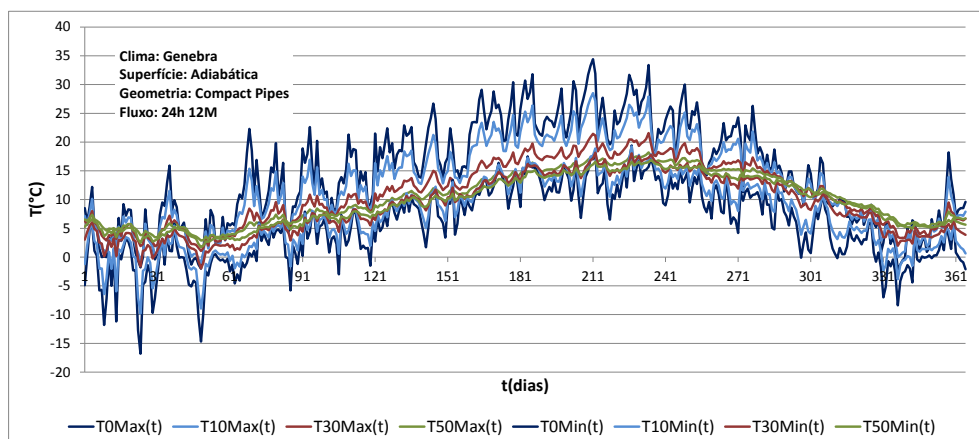


Fig. O1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

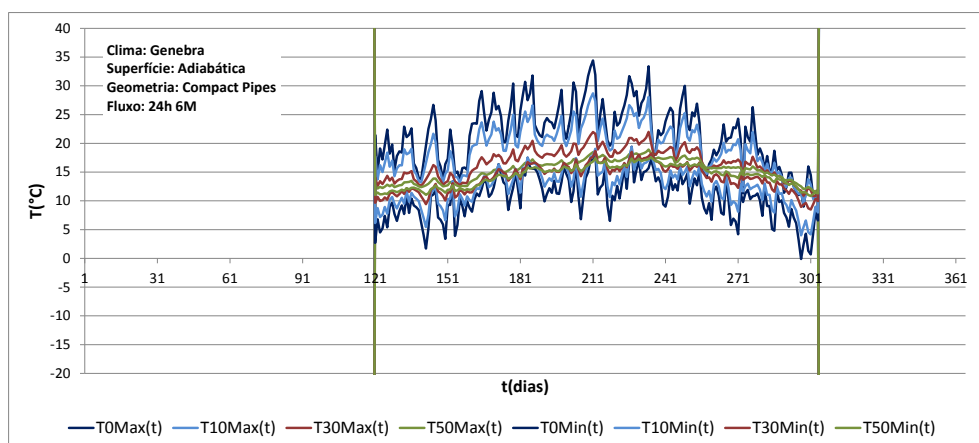


Fig. O2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

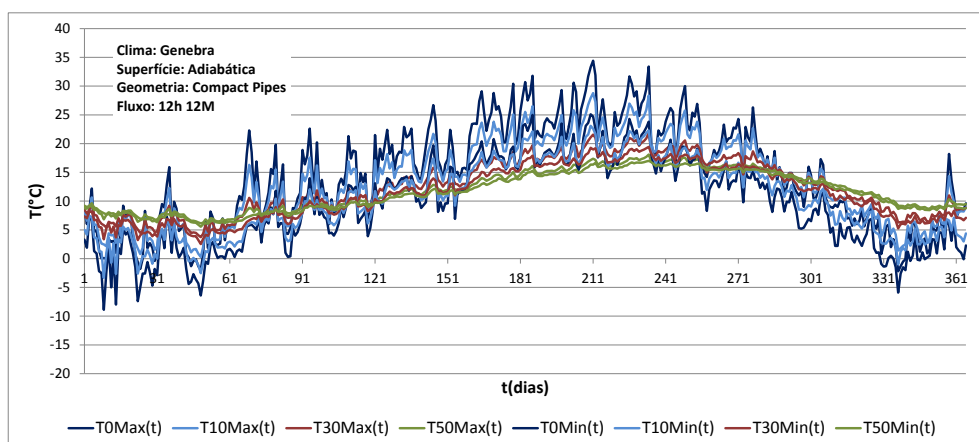


Fig. O3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

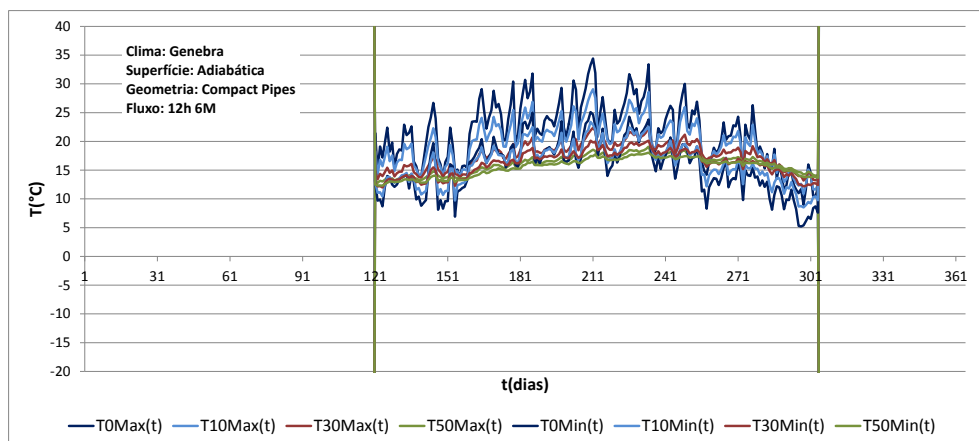


Fig. O4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

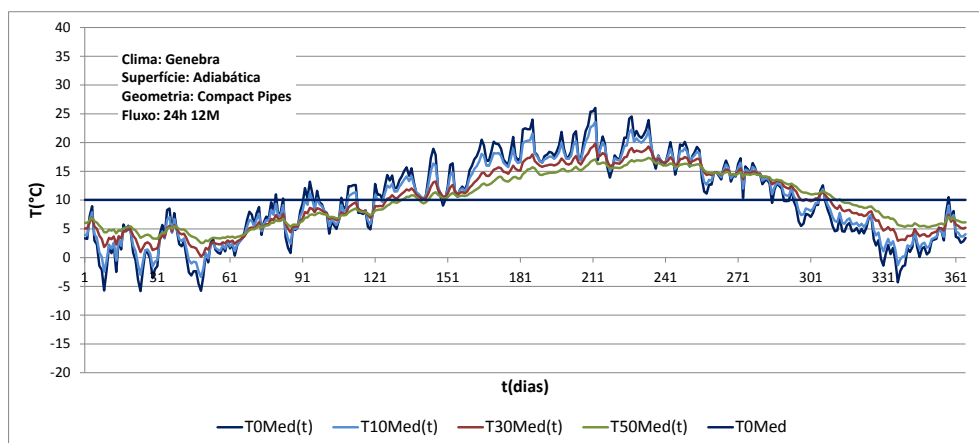


Fig. O5 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

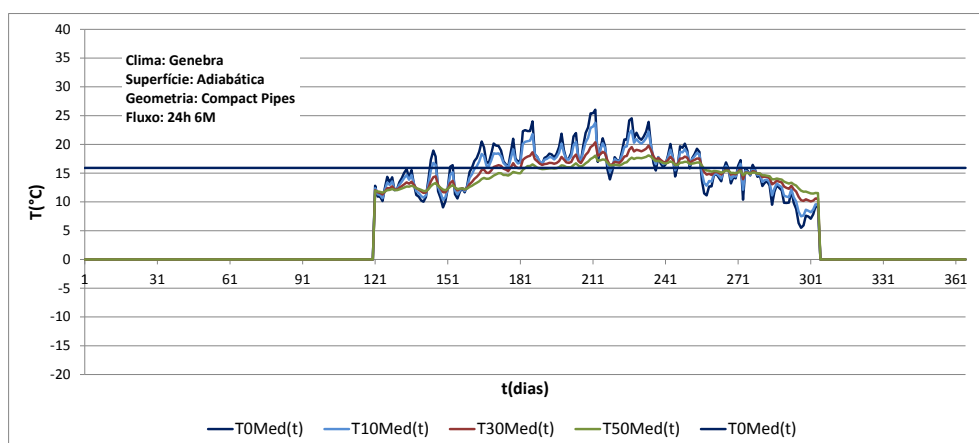


Fig. O6 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

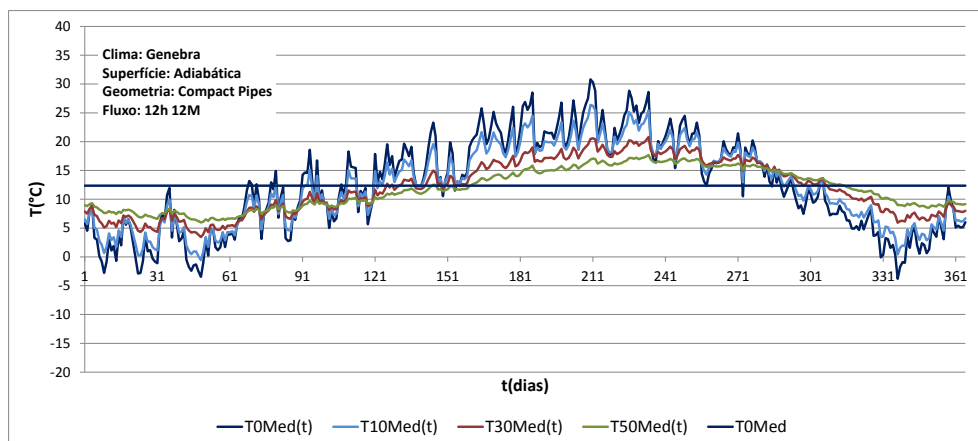


Fig.07 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

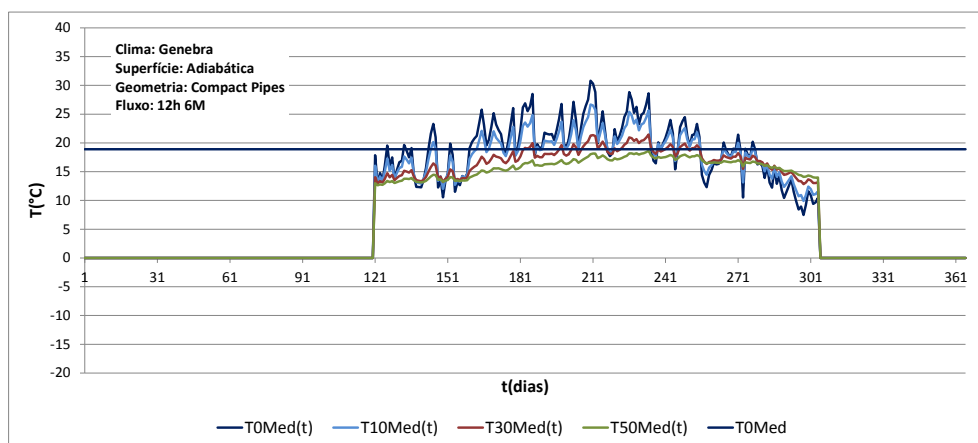


Fig.08 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

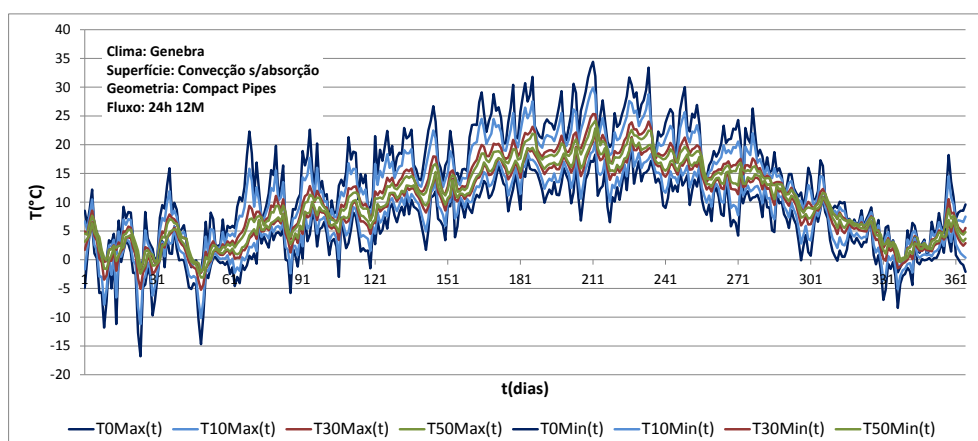


Fig. 09 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

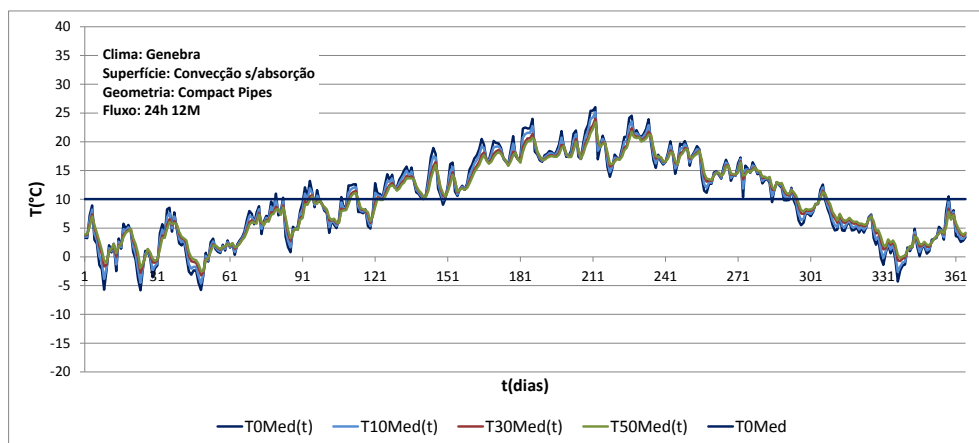


Fig. O10 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

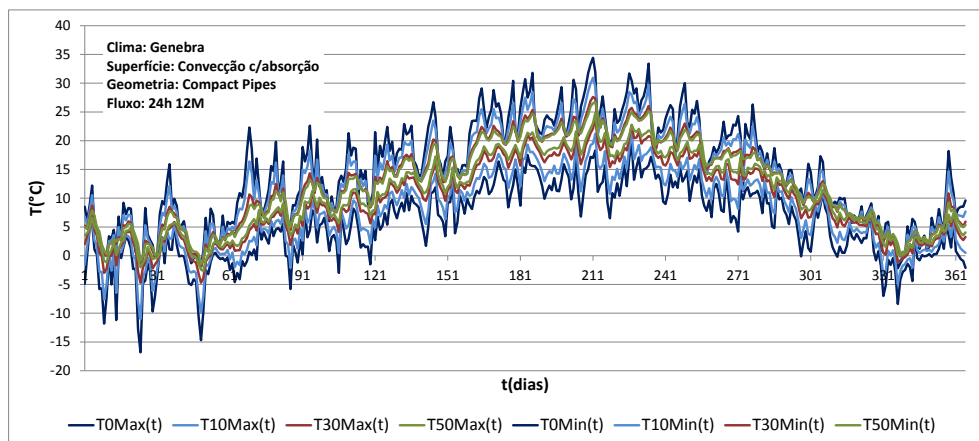


Fig. O11 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M

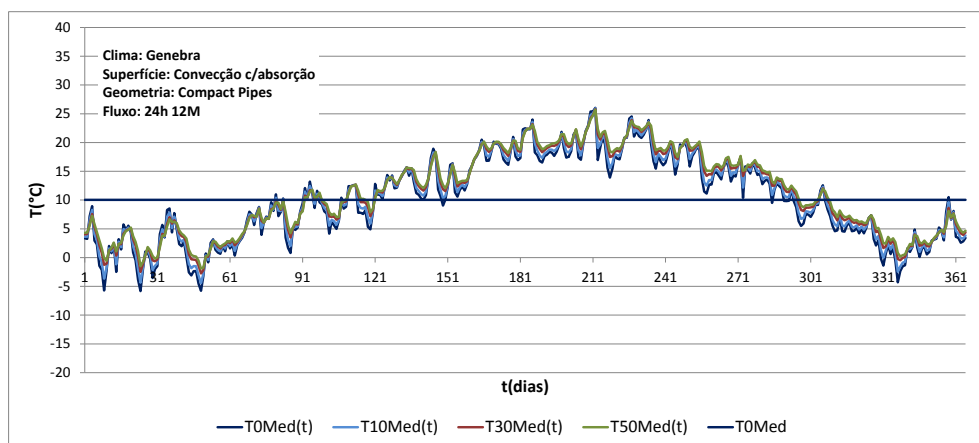


Fig. O12 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M

Anexo P - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Compact Pipes* e clima de São Paulo

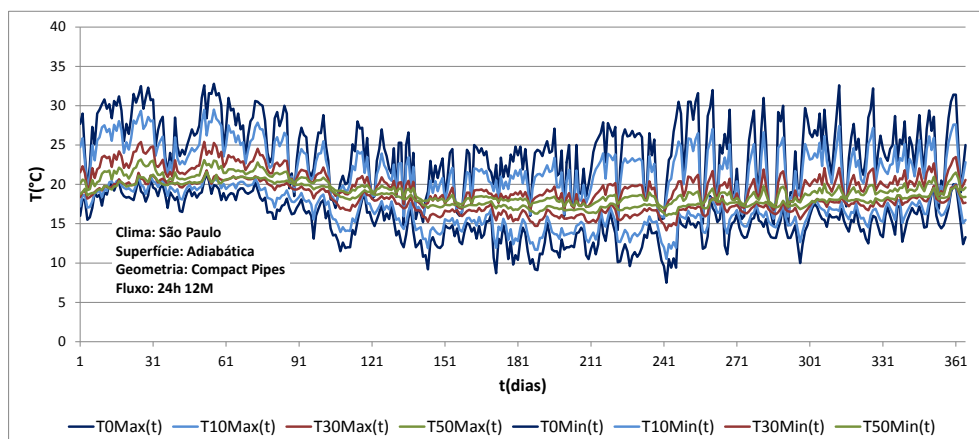


Fig. P1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

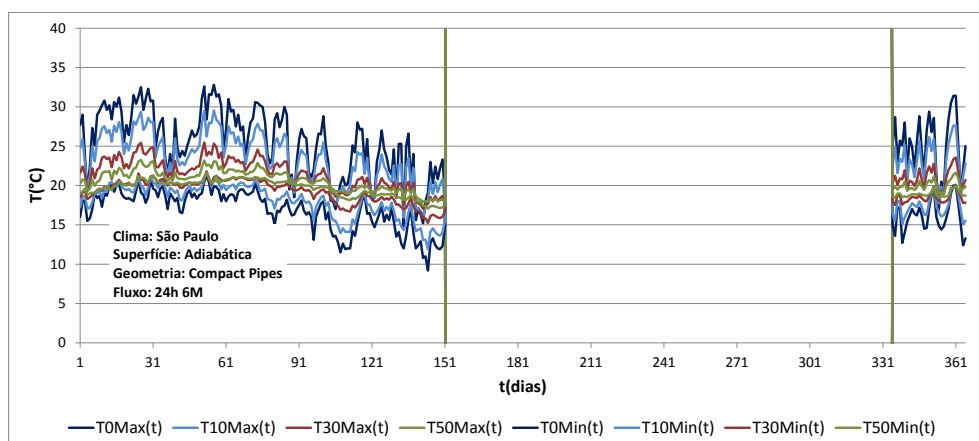


Fig. P2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

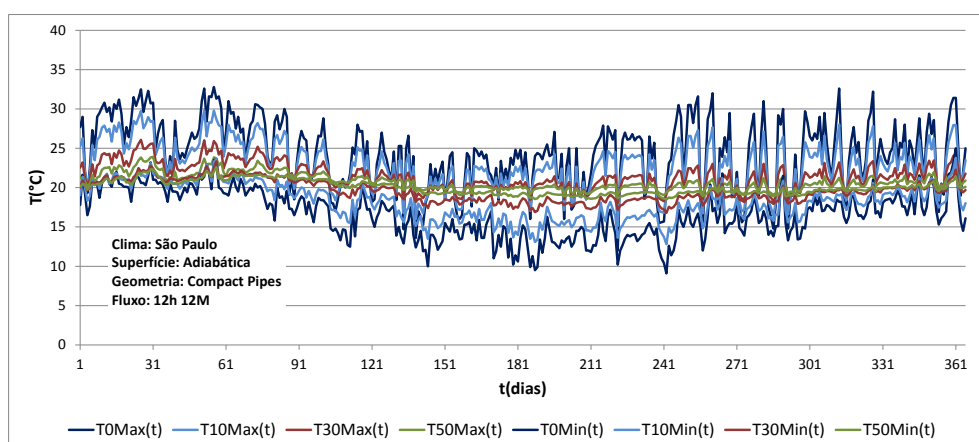


Fig. P3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

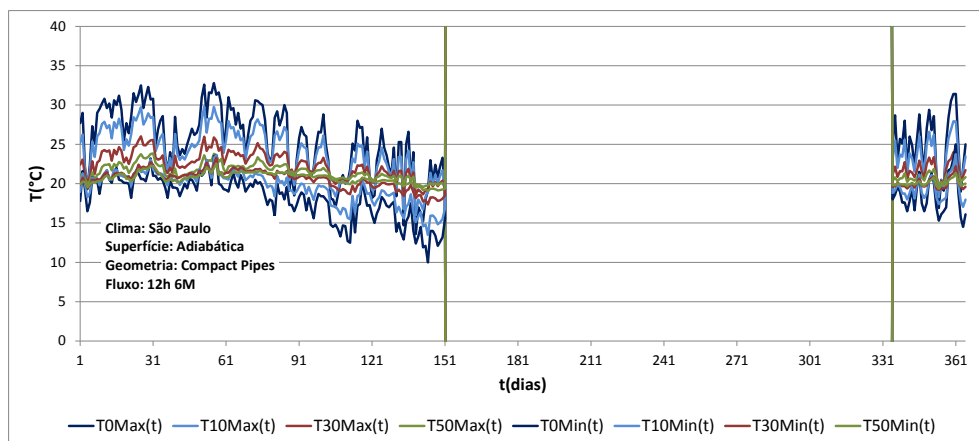


Fig. P4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

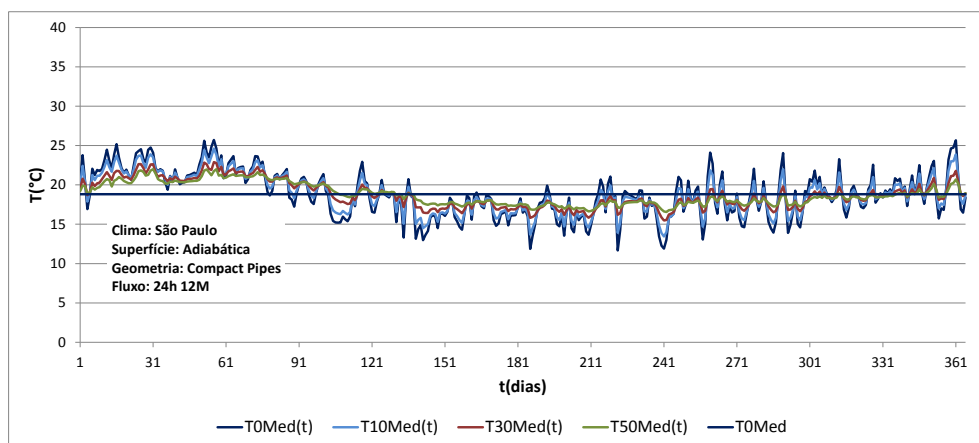


Fig. P5 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

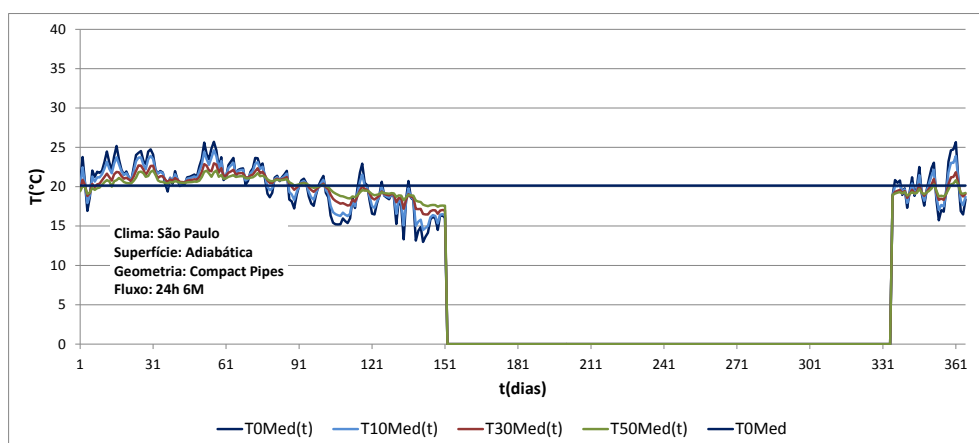


Fig. P6 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

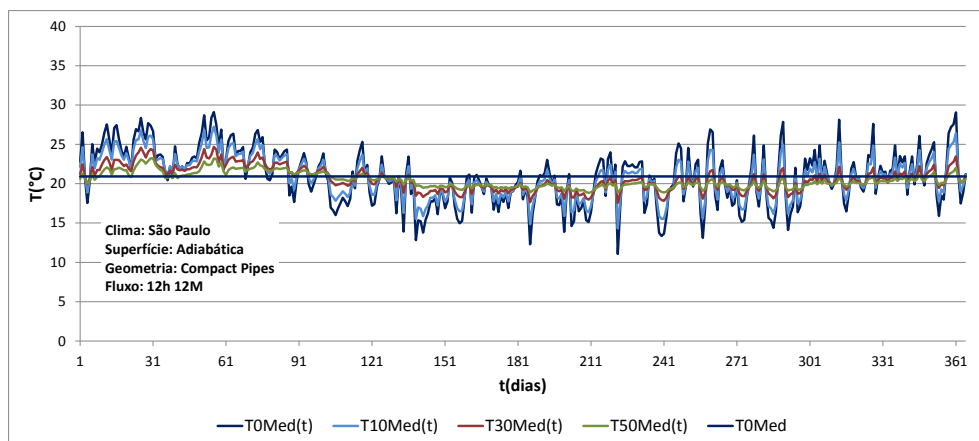


Fig. P7 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

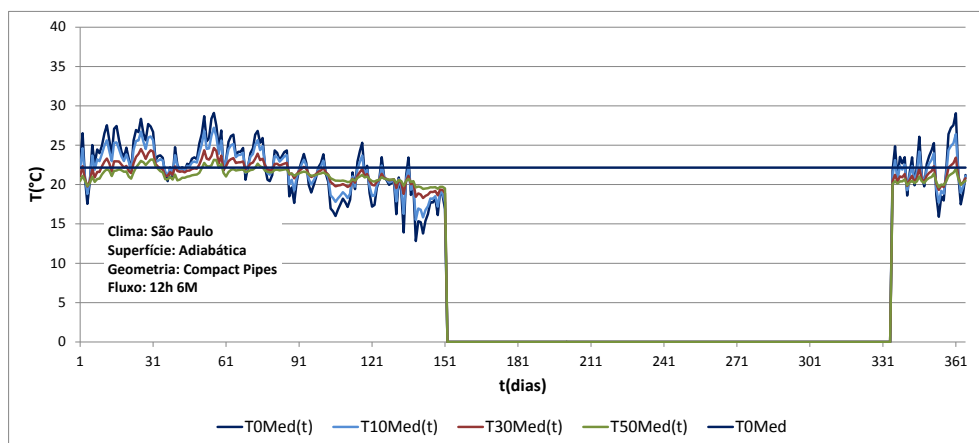


Fig. P8 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

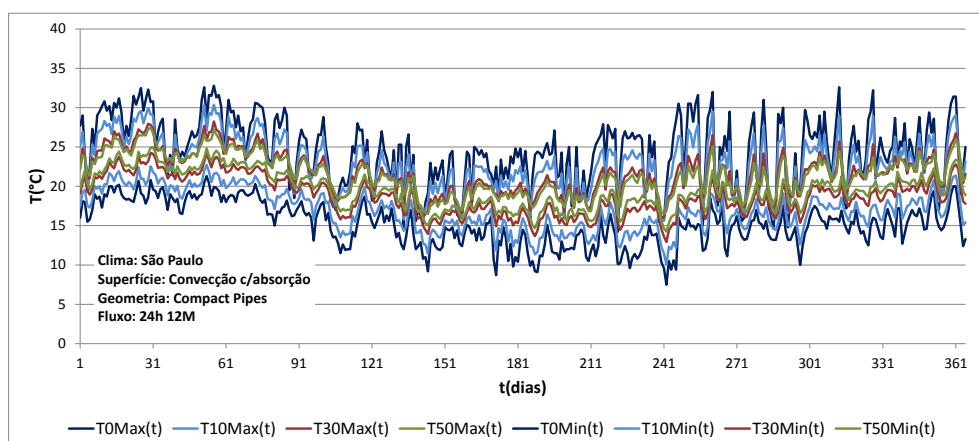


Fig. P9 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

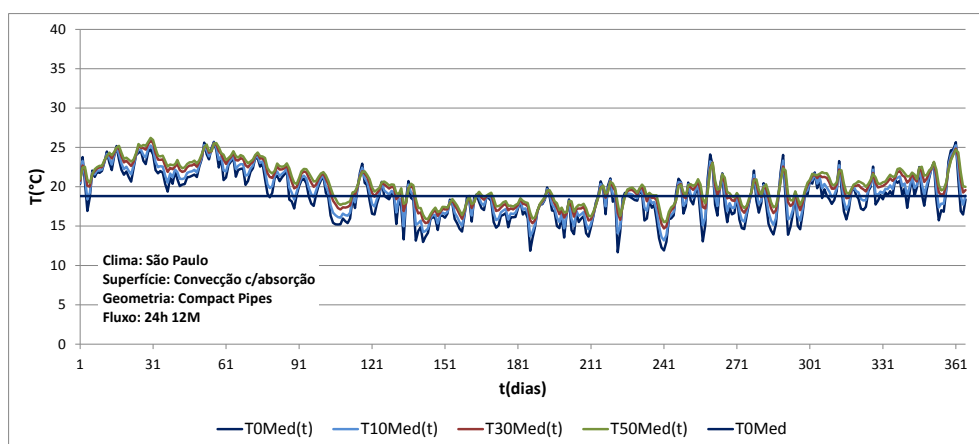


Fig. P10 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

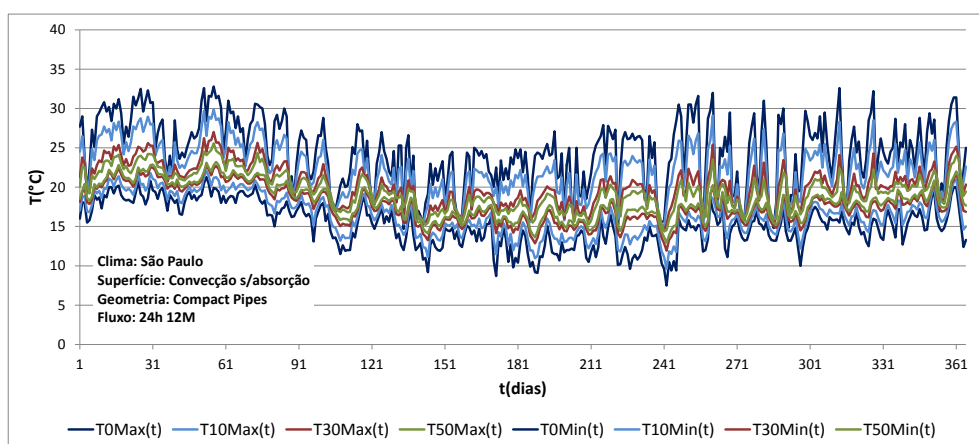


Fig. P11 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M.

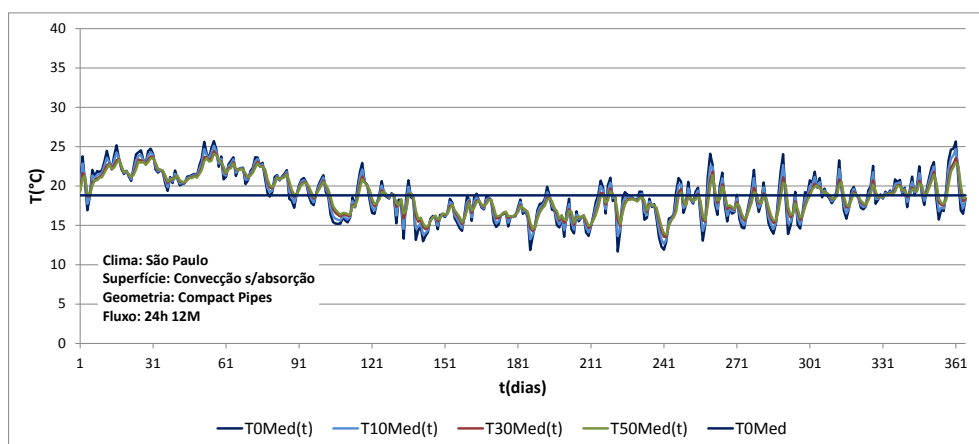


Fig. P12 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M.

Anexo Q - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Distant Pipes* e clima Virtual

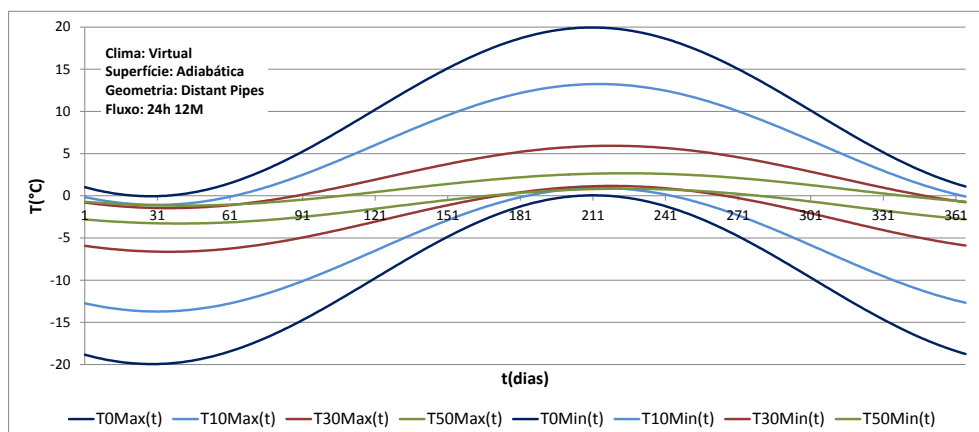


Fig. Q1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

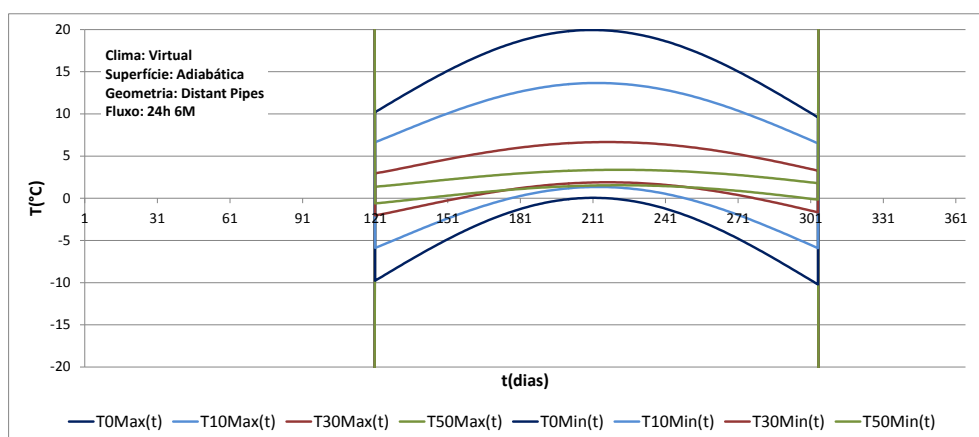


Fig. Q2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

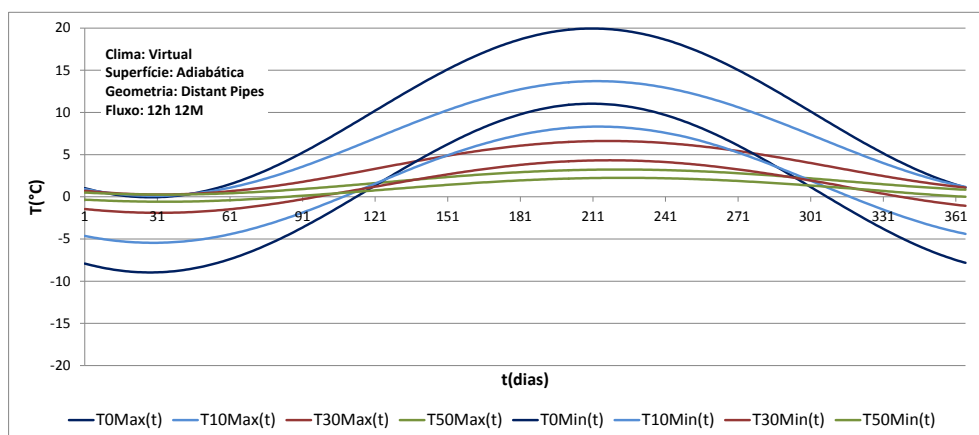


Fig. Q3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

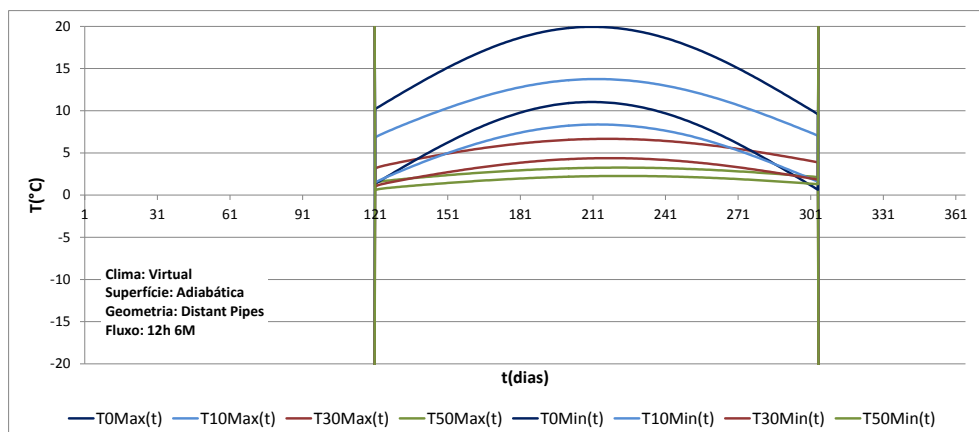


Fig. Q4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

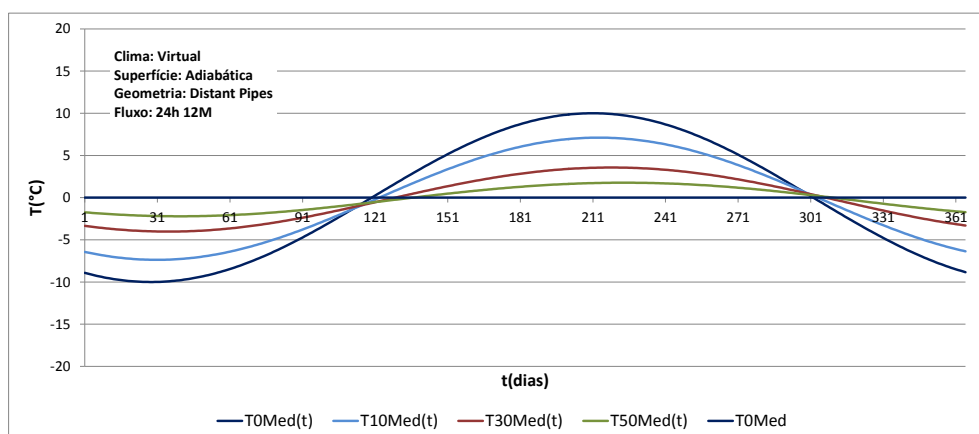


Fig. Q5 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

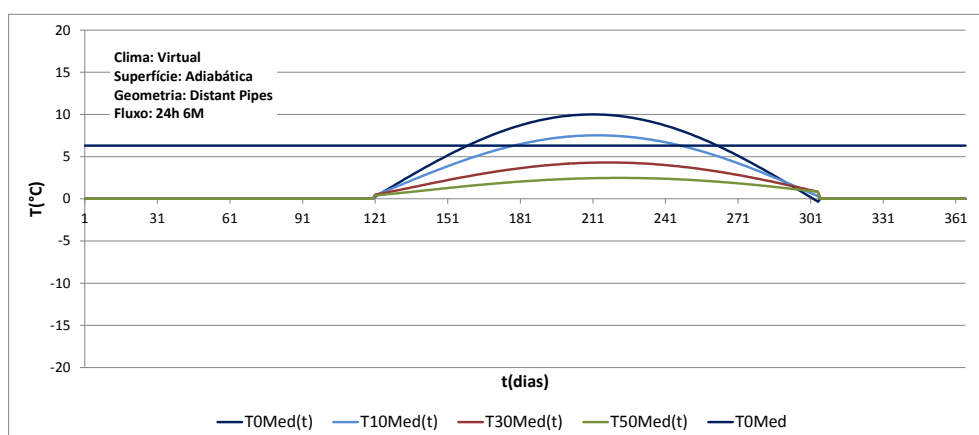


Fig. Q6 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

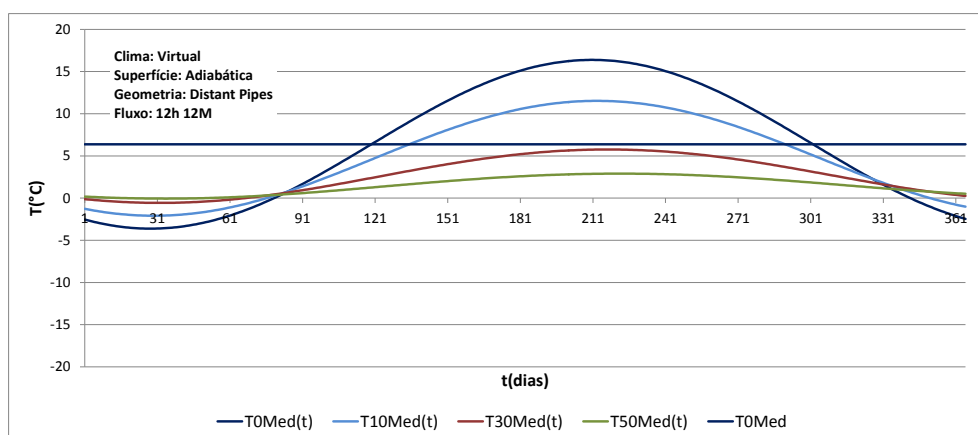


Fig. Q7 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

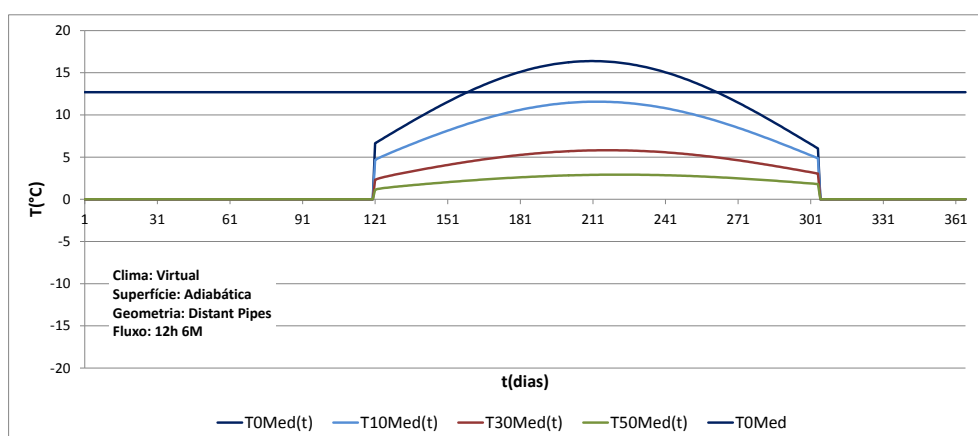


Fig. Q8 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

Anexo R - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Distant Pipes* e clima de Lisboa

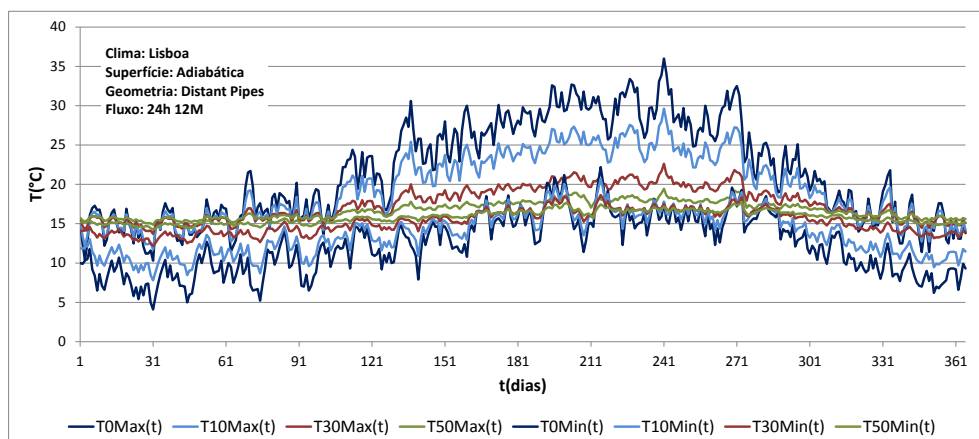


Fig. R1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

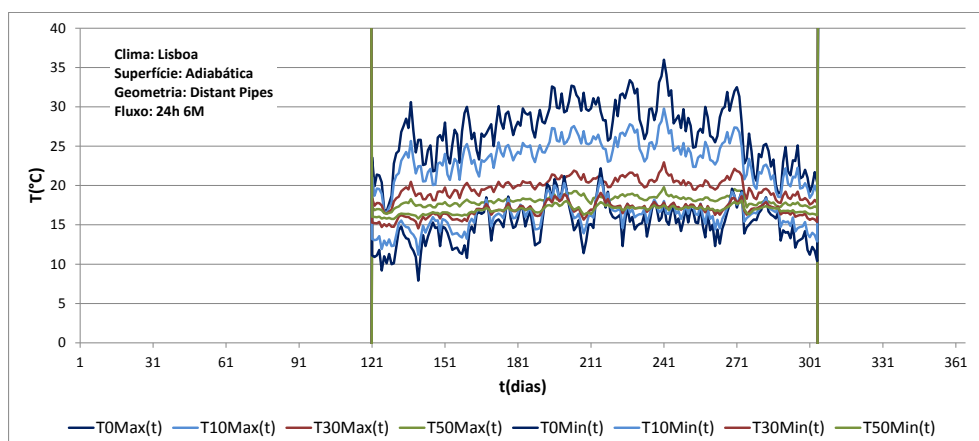


Fig. R2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

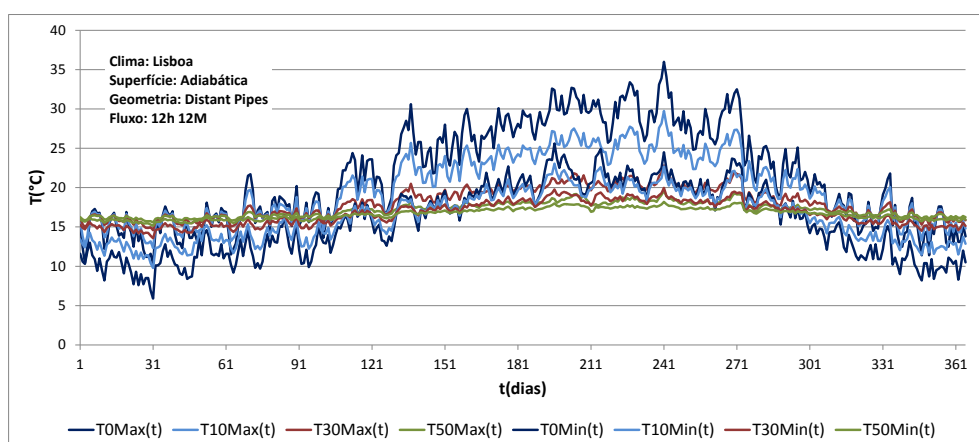


Fig. R3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

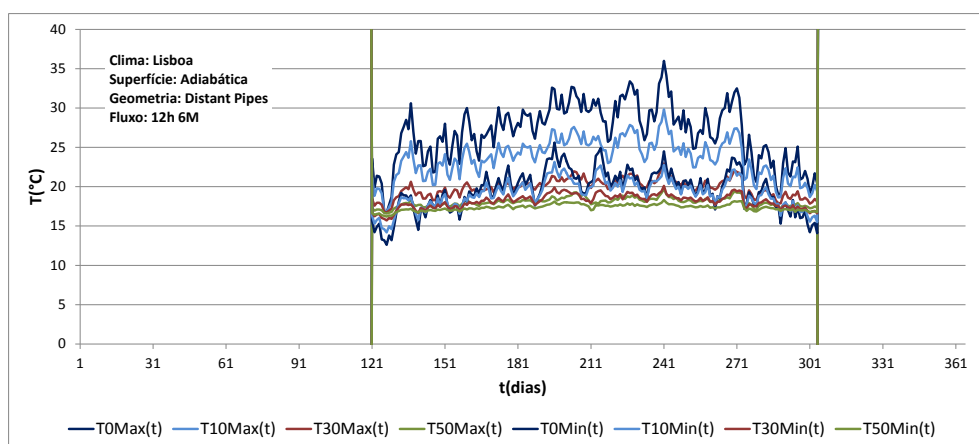


Fig. R4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

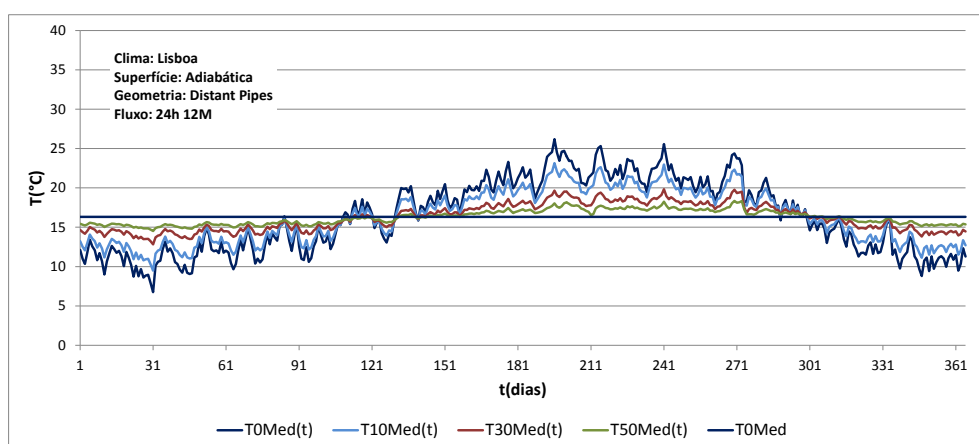


Fig. R5 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

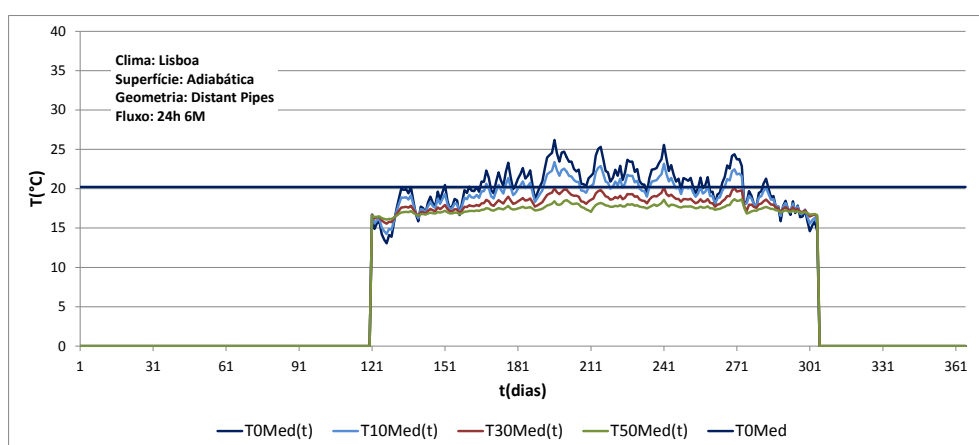


Fig. R6 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

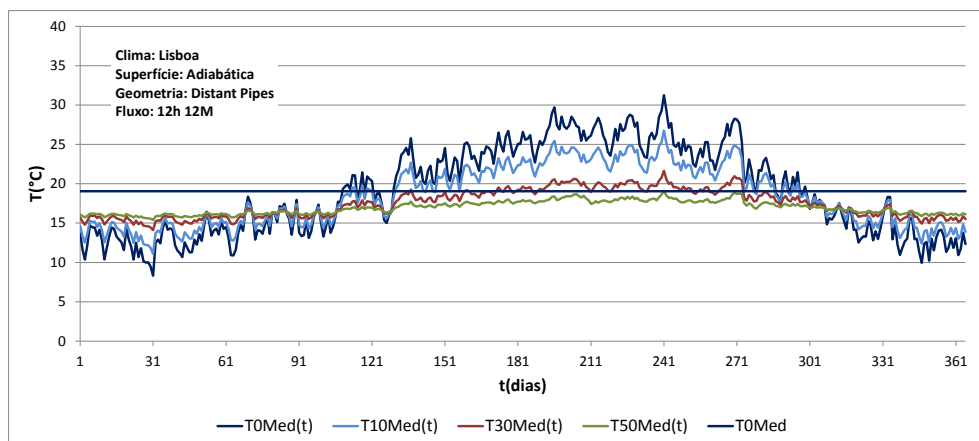


Fig. R7 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

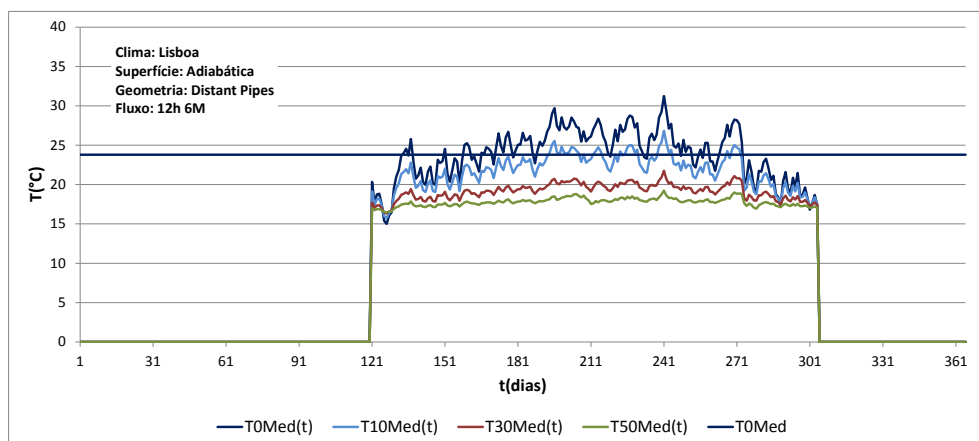


Fig. R8 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

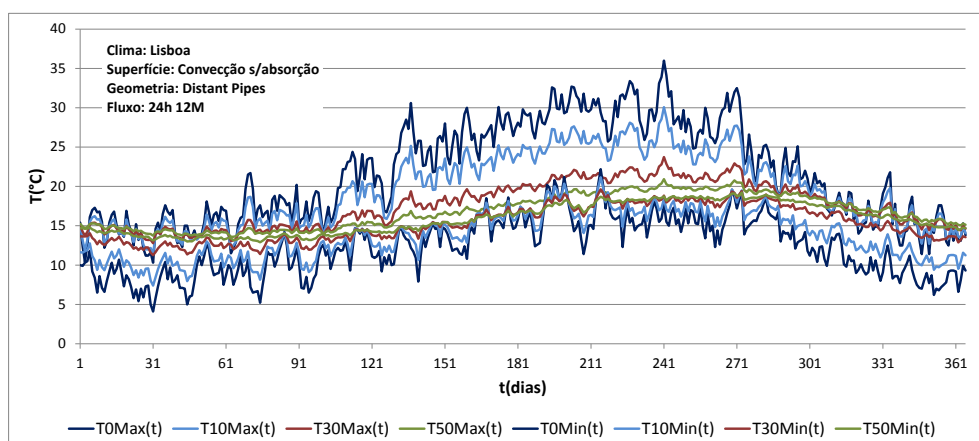


Fig. R9 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

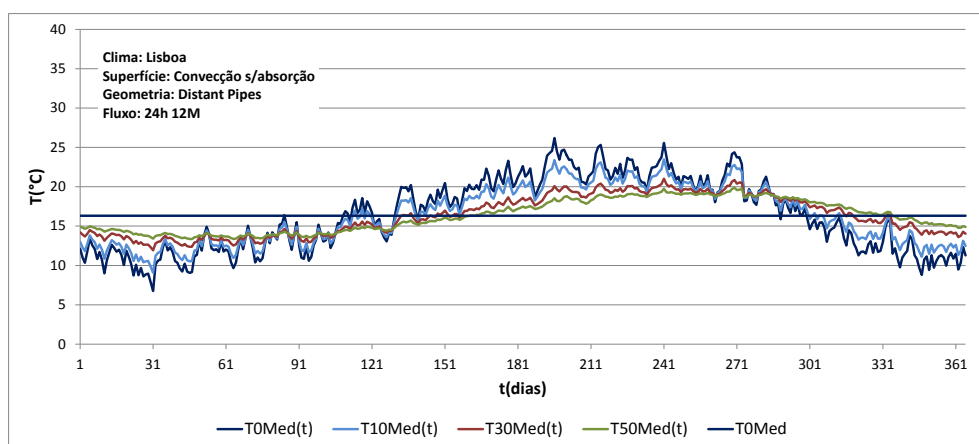


Fig. R10 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M.

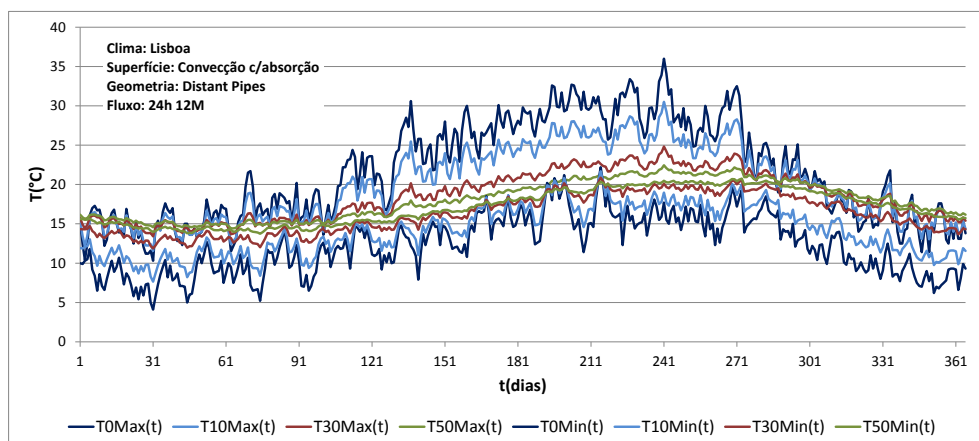


Fig. R11 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M.

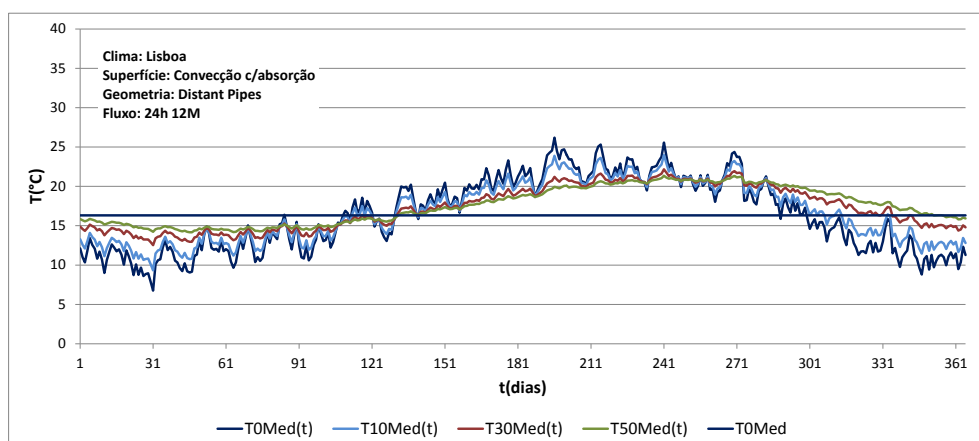


Fig. R12 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M.

Anexo S - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Distant Pipes* e clima de Genebra

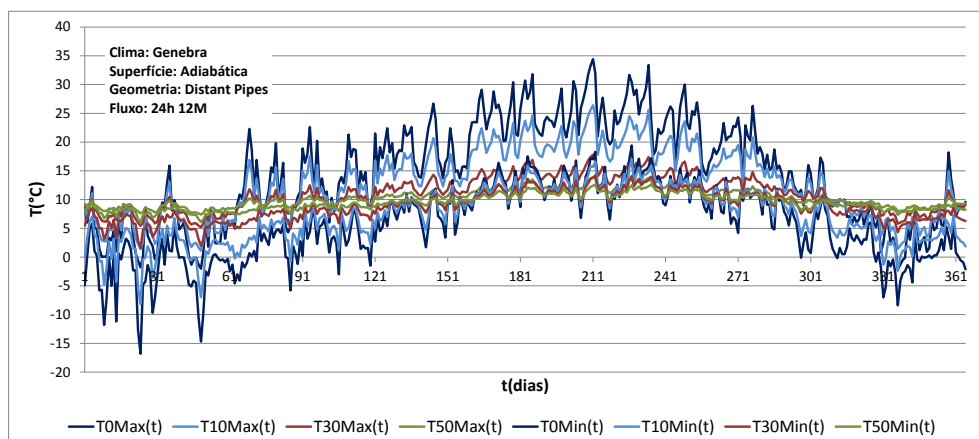


Fig. S1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

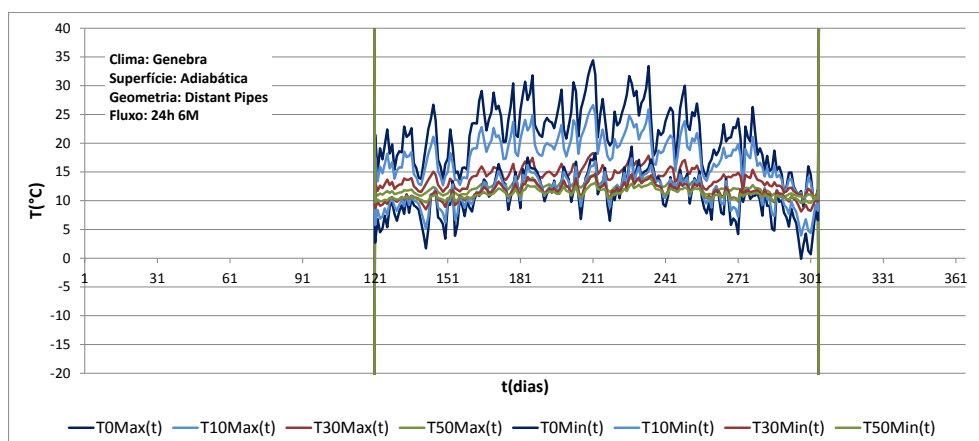


Fig. S2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

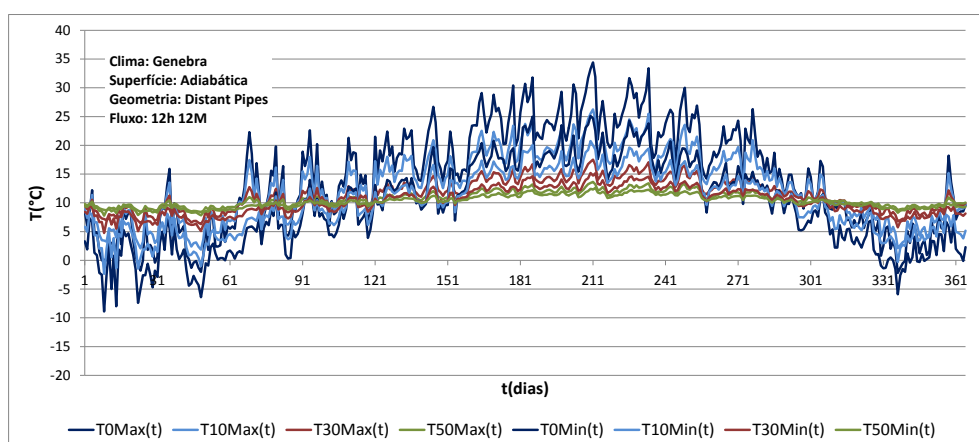


Fig. S3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

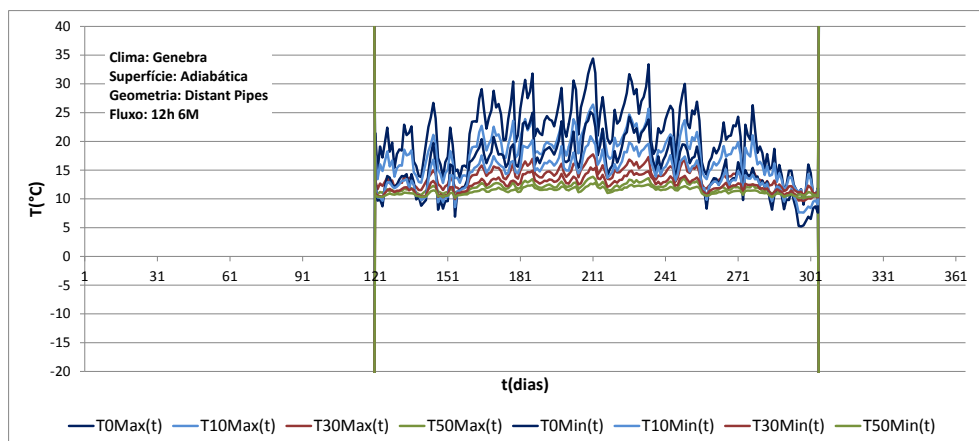
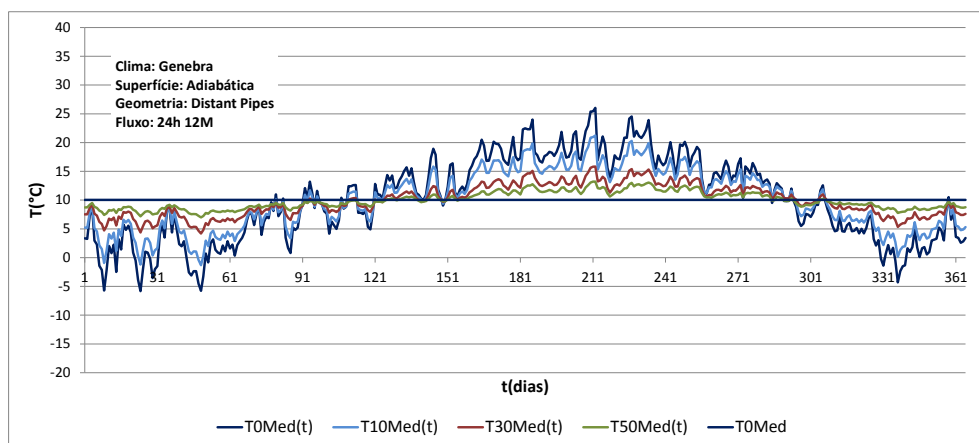


Fig. S4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.



Fi. S5 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

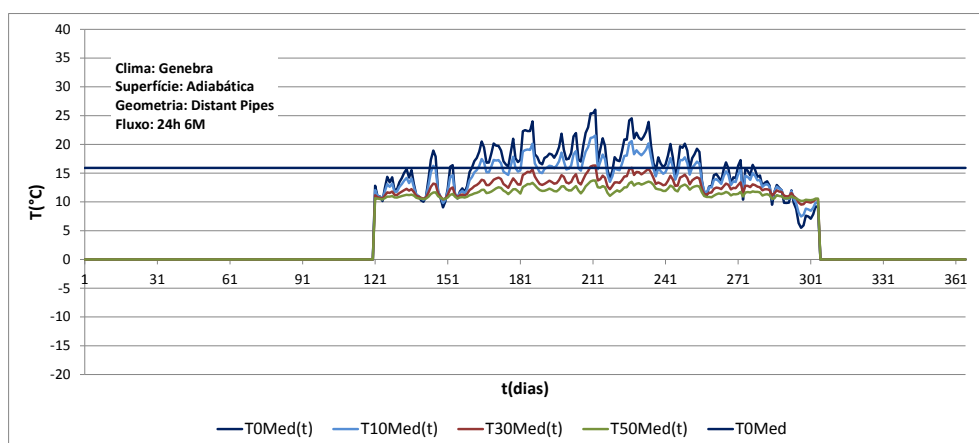


Fig. S6 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

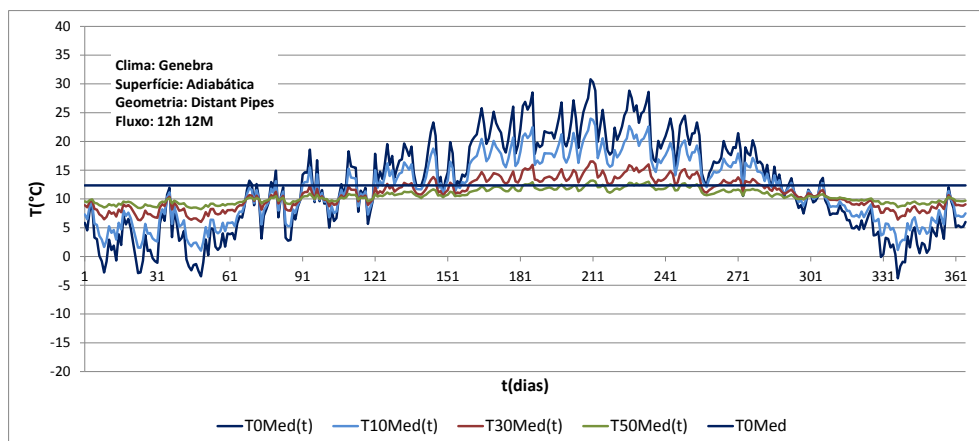


Fig. S7 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

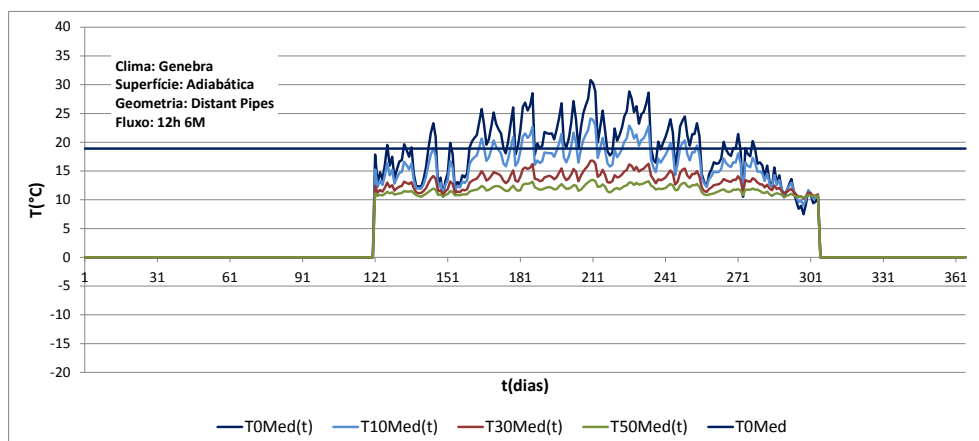


Fig.S8 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

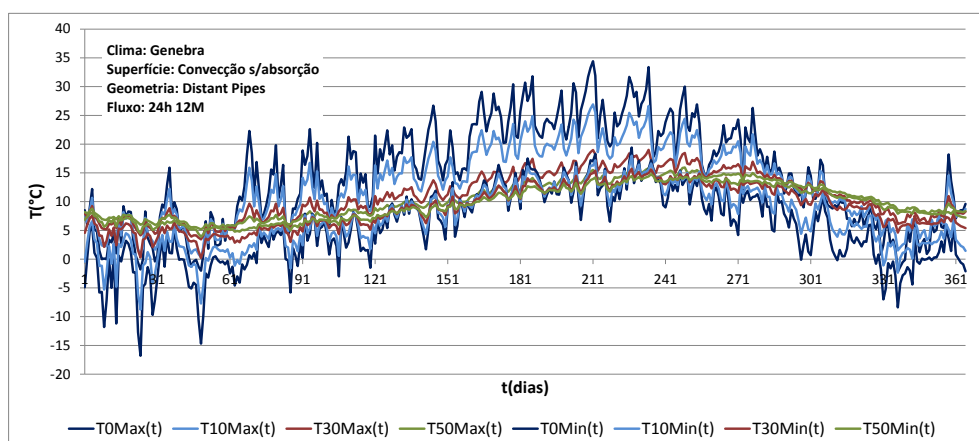


Fig. S9 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

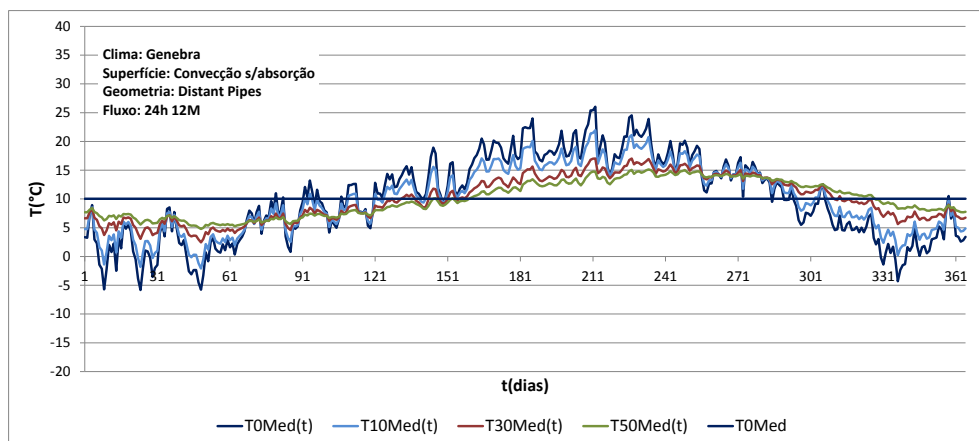


Fig.S10 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M

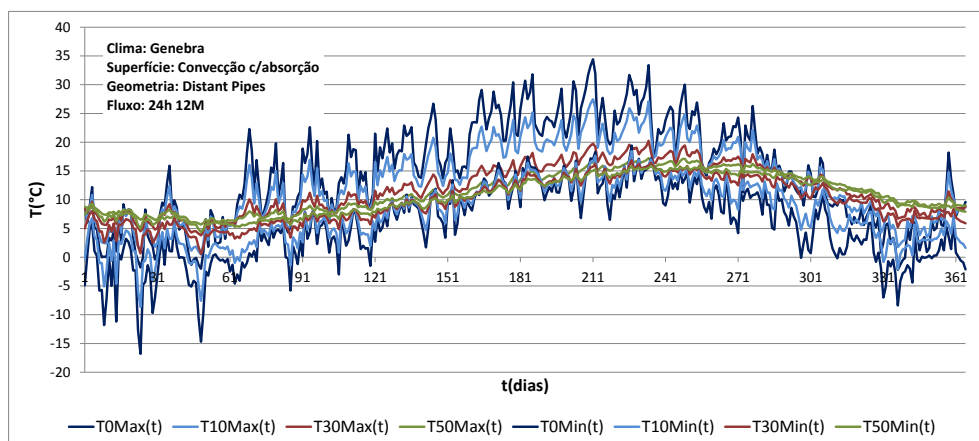


Fig.S11 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M

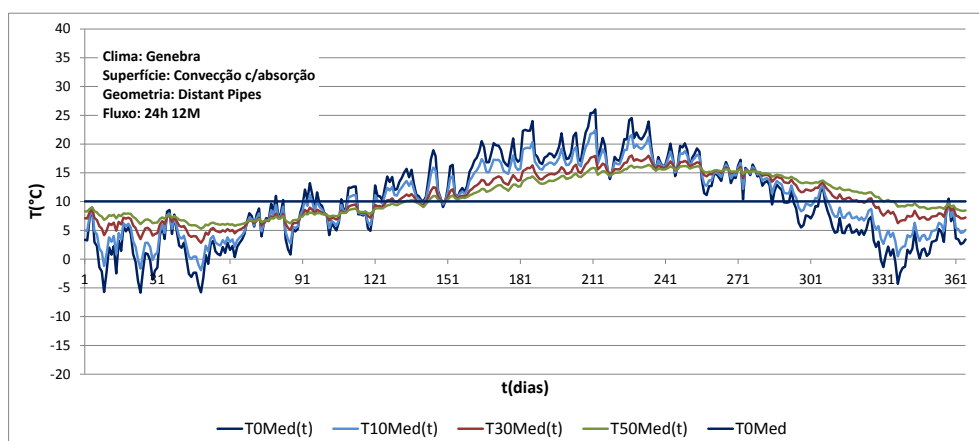


Fig.S12 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M

Anexo T - Extremos diários e temperaturas médias do ar: geometria *Distant Pipes* e clima de São Paulo

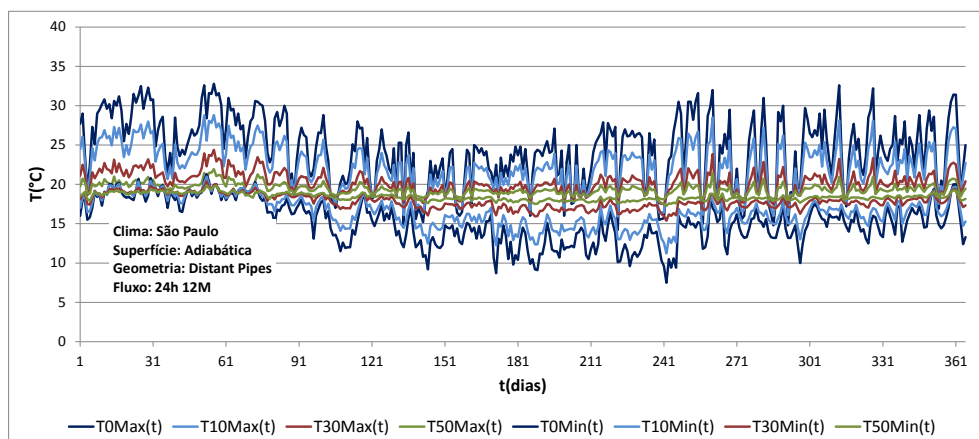


Fig. T1 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

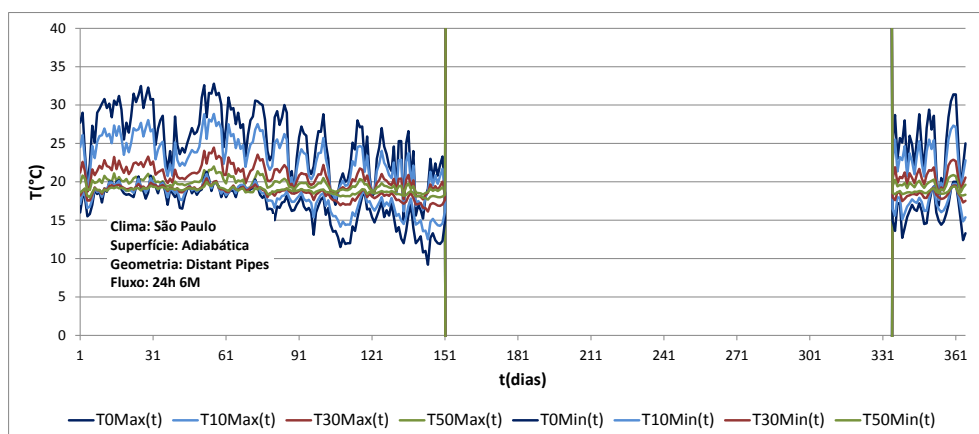


Fig. T2 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

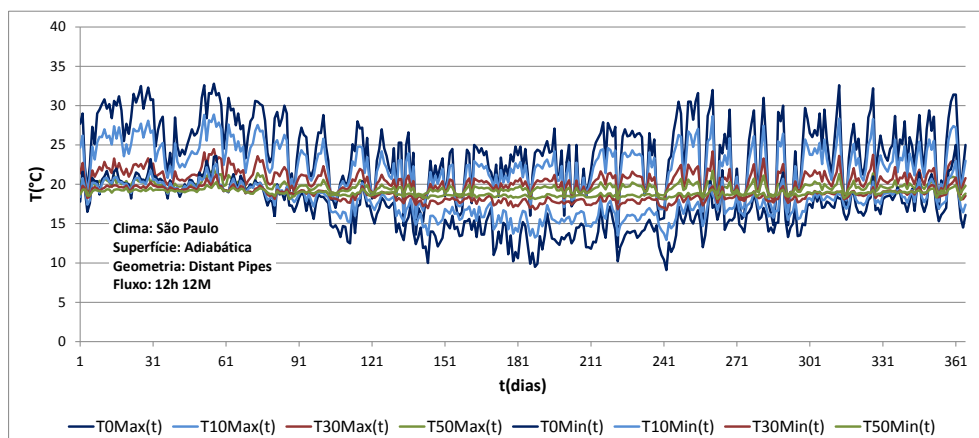


Fig. T3 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

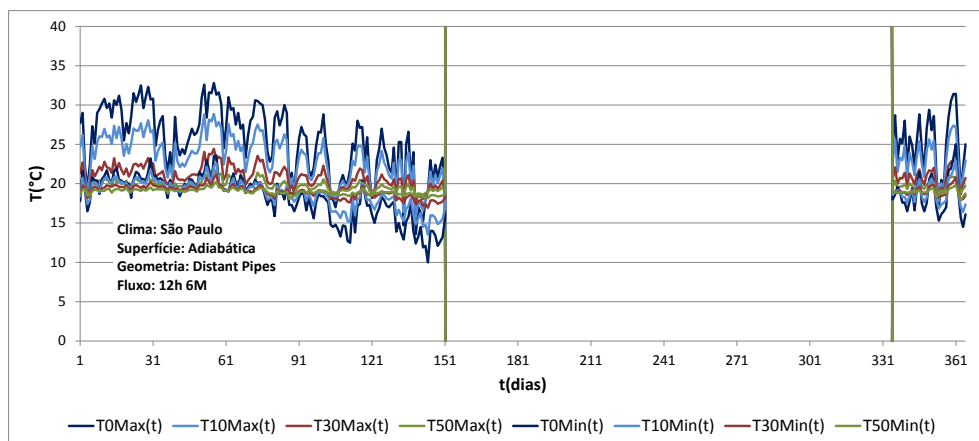


Fig. T4 - Extremos de temperatura diários para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

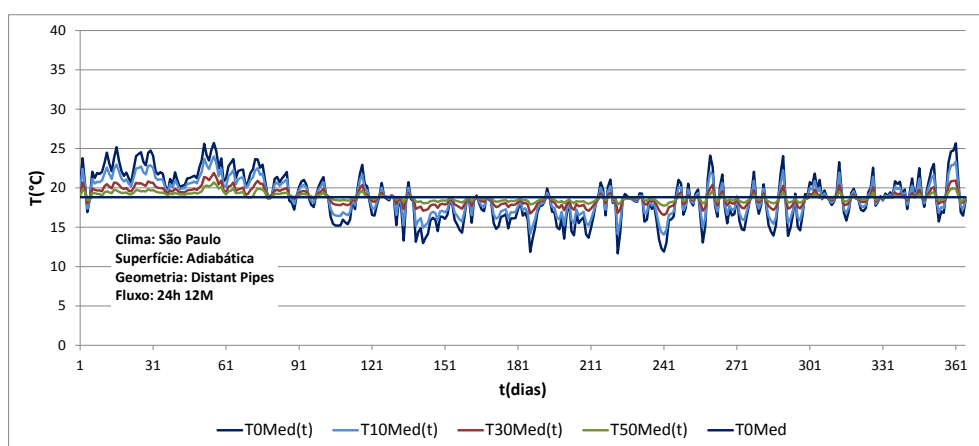


Fig. T5 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h12M.

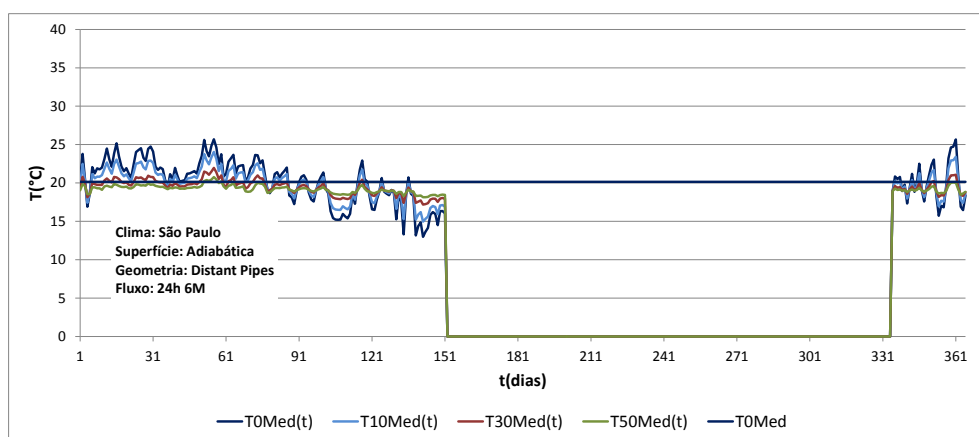


Fig. T6 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 24h6M.

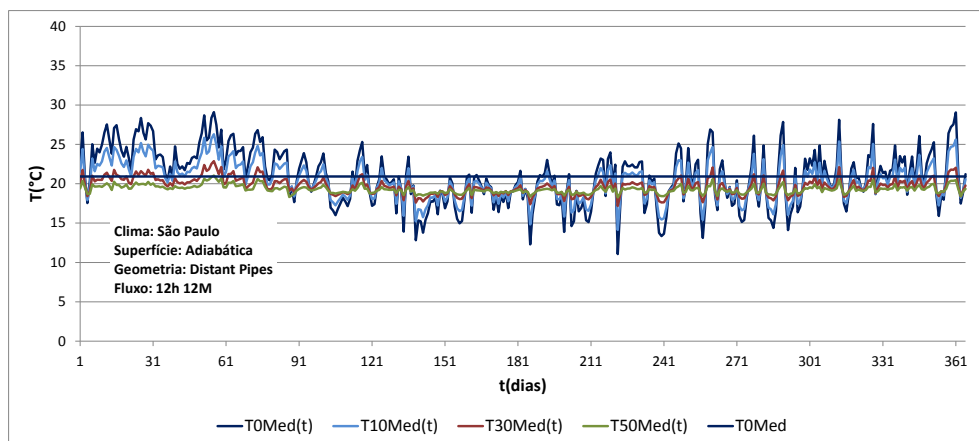


Fig. T7 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h12M.

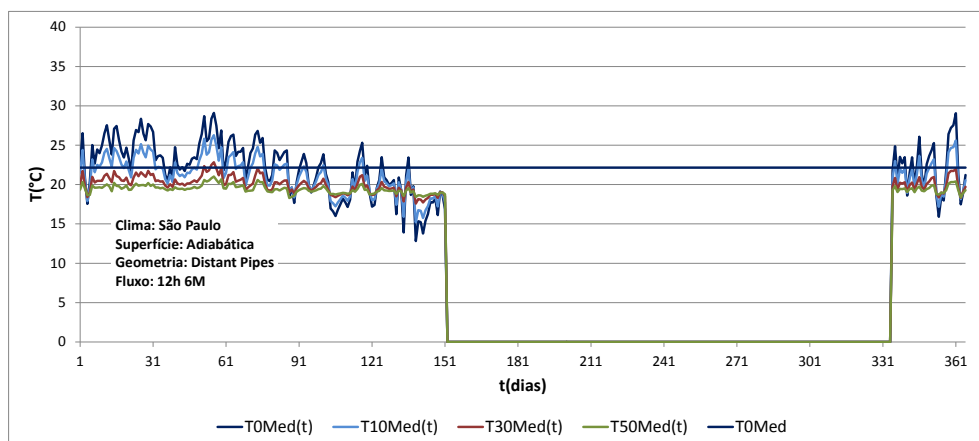


Fig. T8 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície adiabática e fluxo 12h6M.

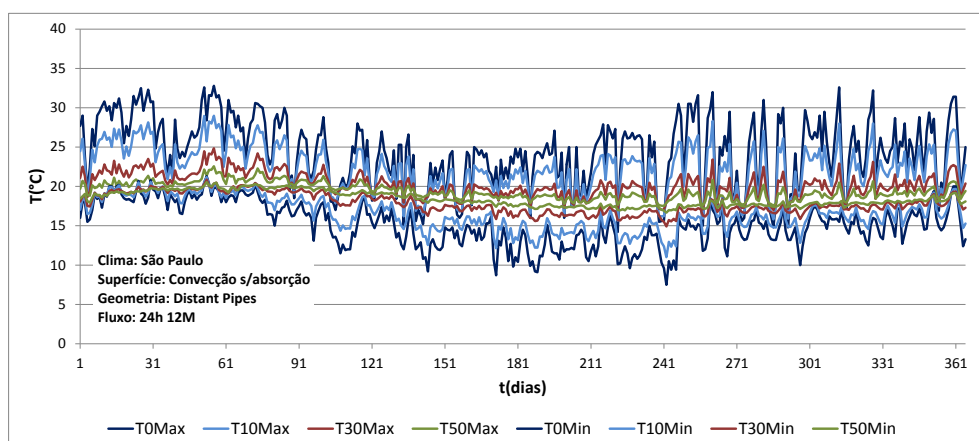


Fig. T9 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M .

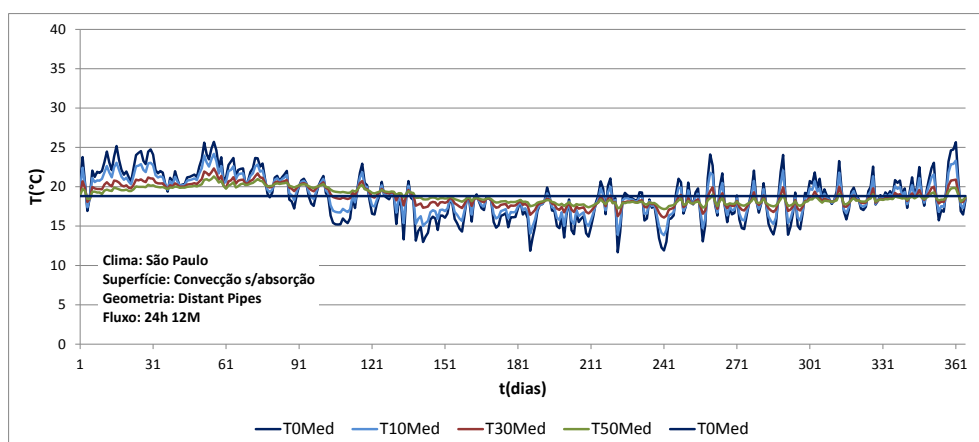


Fig. T10 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção sem absorção solar e fluxo 24h12M.

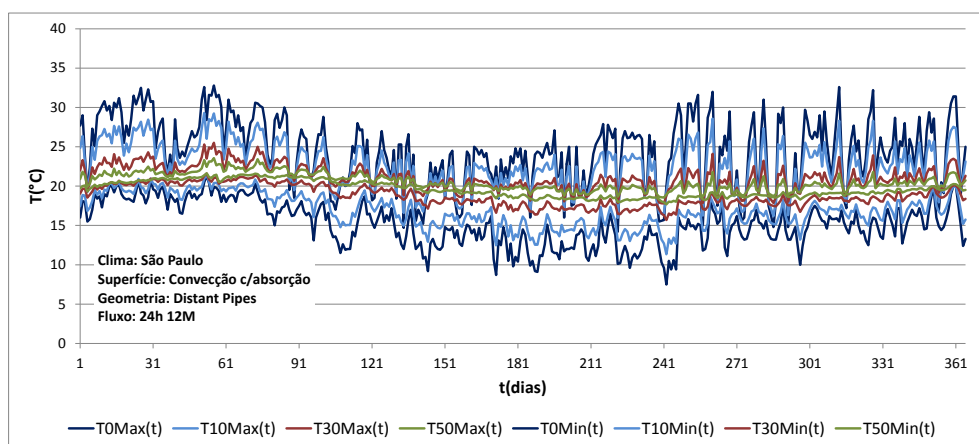


Fig. T11 - Extremos de temperatura diários para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M

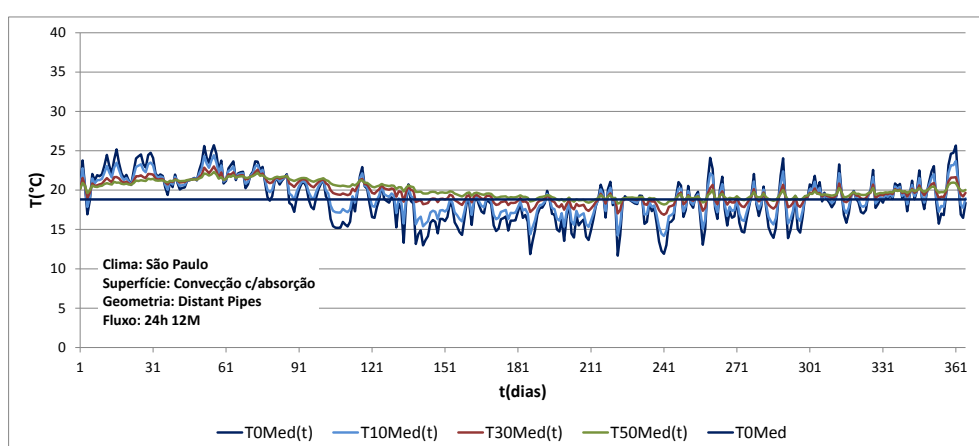


Fig. T12 - Temperatura média diária e temperatura média do período de funcionamento para superfície com convecção com absorção solar e fluxo 24h12M